



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

REKONSTRUKCE POVRCHU Z MRAČNA BODŮ

SURFACE RECONSTRUCTION FROM POINT CLOUDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ JARŮŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŠPANĚL, Ph.D.

BRNO 2017

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2016/2017

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Jarůšek Tomáš**

Obor: Informační technologie

Téma: **Rekonstrukce povrchu z mračna bodů**
Surface Reconstruction from Point Clouds

Kategorie: Počítačová grafika

Pokyny:

1. Prostudujte základy počítačového vidění. Zaměřte se na problematiku zpracování tzv. mračna bodů (point clouds), které vznikají při 3D rekonstrukci z obrazu.
2. Prostudujte dostupné materiály na téma rekonstrukce povrchu z mračna bodů. Seznamte se s existujícími nástroji (např. knihovna PCL).
3. Vyberte vhodné metody a navrhnete nástroj pro rekonstrukci povrchu z mračna bodů.
4. Experimentujte s vaší implementací a případně navrhnete vlastní modifikace metod.
5. Porovnejte dosažené výsledky a diskutujte možnosti budoucího vývoje.
6. Vytvořte stručný plakát nebo video prezentující vaši práci, její cíle a výsledky.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Splnění prvních tří bodů zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Španěl Michal, Ing., Ph.D.,** UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2016

Datum odevzdání: 17. května 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
602 00 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký
vedoucí ústavu

Abstrakt

Rekonstrukce povrchu z mračna bodů představuje velmi moderní a široce používanou metodu v digitalizaci reálných povrchů. Hlavní zaměření této práce je na srovnání několika algoritmů (Poisson surface reconstruction, Ball Pivoting Algorithm, Fourier surface reconstruction, Wavelet surface reconstruction a Multi-level Partition of Unity implicits), které rekonstruuji původní povrch ve formě trojúhelníkové sítě z orientovaného mračna bodů. Každý algoritmus prošel důkladným testováním na reálných i syntetických datech, které byly dále upraveny pro pokročilejší experimenty. Následné vyhodnocení je provedeno v různých kategoriích. Jak vizuálně, tak s pomocí naměřených metrik (např. Hausdorffova vzdálenost). Společně tyto experimenty poskytují důkladnou analýzu stavu rekonstrukčních algoritmů. Provedené experimenty ukazují, že výběr optimální metody závisí na konkrétní úloze. V zásadě však nejlepších výsledků dosahují metody Poisson surface reconstruction a Fourier surface reconstruction.

Abstract

Surface reconstruction from point clouds represents very modern and widely used method for digitalization of real surfaces. The main focus of this work is on a comparison of several algorithms (Poisson surface reconstruction, Ball Pivoting Algorithm, Fourier surface reconstruction, Wavelet surface reconstruction and Multi-level Partition of Unity implicits) that reconstruct original surface in a form of triangle mesh from an oriented point cloud. Every algorithm was used in a series of tests on both real and synthetic datasets which were also modified to suit more complicated experiments. The following evaluation is done in various categories. The results are evaluated both visually and with calculated measures (such as Hausdorff distance). Together these experiments depict a detailed analysis of the state of surface reconstruction algorithms. Our experiments show that the selection of optimal algorithm depends on a concrete task. Overall Poisson surface reconstruction and Fourier surface reconstruction provide the best results.

Klíčová slova

mračno bodů, rekonstrukce povrchu, trojúhelníková síť, srovnání

Keywords

point cloud, surface reconstruction, triangle mesh, comparison

Citace

JARŮŠEK, Tomáš. *Rekonstrukce povrchu z mračna bodů*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Michal Španěl, Ph.D.

Rekonstrukce povrchu z mračna bodů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Michala Španěla. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Tomáš Jarůšek

17. května 2017

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalu Španělovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a vynaložené úsilí a čas, který mé práci poskytl.

Obsah

1	Úvod	2
2	Algoritmy rekonstrukce povrchu	3
2.1	Ball Pivoting Algorithm	3
2.2	Poisson surface reconstruction	4
2.3	Fourier surface reconstruction	5
2.4	Wavelet surface reconstruction	6
2.5	Multi-level Partition of Unity implicits	7
3	Metriky	9
3.1	Počet trojúhelníků	9
3.2	Uzavřenost a genus	9
3.3	Hausdorffova vzdálenost a kvadratický průměr	9
4	Návrh testování	11
4.1	Testovací sada dat	12
5	Praktická realizace	20
5.1	Použité nástroje	20
5.2	Konverze stažených dat	21
5.3	Implementace test. algoritmů	21
5.4	Měření časové a paměťové náročnosti	22
6	Vyhodnocení	23
6.1	Vstupní data různých velikostí a hustoty	23
6.2	Vstupní data uniformní hustoty s aplikovaným šumem	32
6.3	Chybějící data	38
6.4	Nekompletní model	40
6.5	Torus, ostré hrany	43
6.6	Uzel	45
6.7	Shrnutí	46
7	Závěr	47
	Literatura	48
A	Obsah přiloženého CD	49

Kapitola 1

Úvod

Rekonstrukce povrchu z mračna bodů představuje velmi moderní a široce používanou metodu v digitalizaci reálných povrchů, do které bylo investováno značné úsilí v posledních dvaceti letech. Problém rekonstrukce povrchu se dá jednoduše formulovat jako: z bodů, které byly naskenovány z určitého povrchu, zrekonstruujte co nejlépe původní povrch, ze kterého body pocházejí. Počítačový popis reálných objektů je důležitý ve stavebních oborech, při restaurování historických objektů nebo při zachování současného kulturního dědictví. Obecnost toho problému dala za vznik širokému spektru rekonstrukčních algoritmů, které se především liší použitým typem vstupních dat a výsledným typem rekonstruovaného modelu.

Účelem této práce je vytvoření přehledného porovnání a vyhodnocení rekonstrukčních algoritmů, které jako vstup požadují orientované mračno bodů a jako výstup vracejí trojúhelníkovou síť, která aproximuje vstupní data.

V tomto porovnání se budeme zabývat pěti volně dostupnými algoritmy rekonstrukce povrchu (Poisson surface reconstruction, Ball Pivoting Algorithm, Fourier surface reconstruction, Wavelet surface reconstruction a Multi-level Partition of Unity implicits), které používají odlišné implementace, což nám poskytne rozmanitá data pro testování a vyhodnocení.

Jako primární zdroj vstupních dat jsou v této práci použity volně dostupné modely různé kvality, které byly vytvořeny spojením několika skenů reálných objektů. Tyto data jsou dále upravena, což nám umožní rozšířit testovací sadu o různé kvality stejného modelu, různé úrovně šumu, chybějící data a další.

Závěrečné vyhodnocení je provedeno jak na základě vypočítaných metrik, jako je například Hausdorffova vzdálenost, čas, paměťová náročnost, tak i na vizuálním porovnání výsledných modelů. To nám poskytne několik různých druhů výsledků, z čehož můžeme přesně vyhodnotit kvalitu testovaných rekonstrukčních algoritmů.

Provedené experimenty ukazují, že výběr optimální metody závisí na konkrétní úloze. V zásadě však nejlepších výsledků dosahují metody Poisson surface reconstruction a Fourier surface reconstruction.

Kapitola 2

Algoritmy rekonstrukce povrchu

Pro porovnání bylo vybráno pět volně dostupných rekonstrukčních algoritmů. To zahrnuje

- Ball Pivoting Algorithm (BPA)
- Poisson surface reconstruction (Poisson)
- Fourier surface reconstruction (Fourier)
- Wavelet surface reconstruction (Wavelett Daub4, Haar)
- Multi-level Partition of Unity implicits (MPU)

Všechny algoritmy používají jako vstupní data orientované mračno bodů a vracejí trojúhelníkovou síť, která aproximuje původní povrch. V této kapitole si blíže popíšeme fungování jednotlivých algoritmů a jejich hlavní parametry.

2.1 Ball Pivoting Algorithm

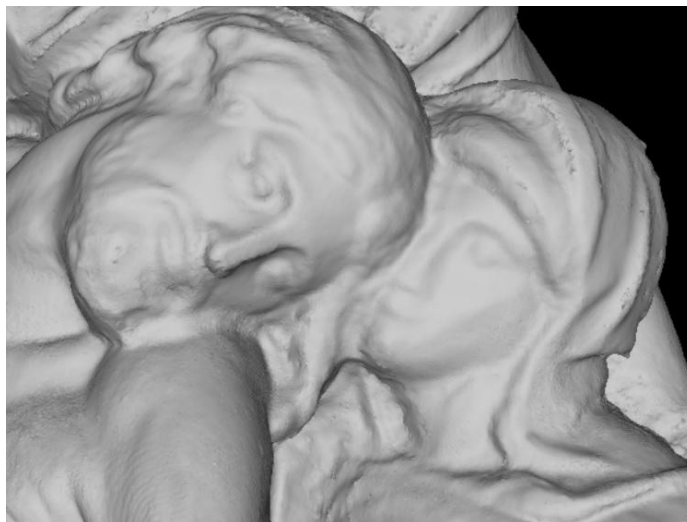
Ball Pivoting Algorithm je algoritmus pro rekonstrukci povrchu, vytvořený v roce 1999. V BPA, koule uživatelem předem definovaného poloměru je posouvána mračnem orientovaných bodů. Jak koule postupuje mračnem, postupně propojuje body do trojúhelníkové sítě. Koule se pohybuje mračnem, dokud všechny dostupné body nejsou propojeny. Základní princip se dá podrobněji popsat ve dvou krocích.

V prvním kroku algoritmu je nutné najít počáteční trojúhelník uvnitř mračna. Tento proces začne výběrem jednoho náhodného bodu. Dále se najdou dva nejbližší sousedi tohoto bodu a následně se z nich vytvoří trojúhelník. K němu vytvoříme kouli, která se dotýká všech jeho vrcholů. Následně zkontrolujeme, zda koule obsahuje další body. Pokud žádné neobsahuje, trojúhelník je zvolen jako startovní. Jinak provedeme první krok odznova.

V druhém kroku pokračujeme rozšířením startovního trojúhelníku tak, že otáčíme kouli o dříve zvoleném poloměru. Tato koule se otáčí okolo aktivní hrany trojúhelníku, dokud se nedotkne dalšího bodu v mračnu. Tento nově najitý bod je připojen ke koncovým bodům aktivní hrany, z čehož vznikne nový trojúhelník. Tento proces pokračuje tak dlouho, dokud všechny dostupné body nebyly propojeny.

Když se koule posouvá mračnem bodů, vznikají většinou v trojúhelníkové síti díry. To je způsobeno buď nedostatkem bodů v oblasti, nebo nedostatkem orientovaných normál v mračnu. Větší díry můžeme uzavřít opětovným průchodem algoritmu s větším poloměrem

koule, menší díry můžeme vyplnit tak, že se vytvoříme trojúhelník spojující jejich hrany. Ukázku vidíme na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Ukázka rekonstrukce Florentské Piety. Převzato z:[6]

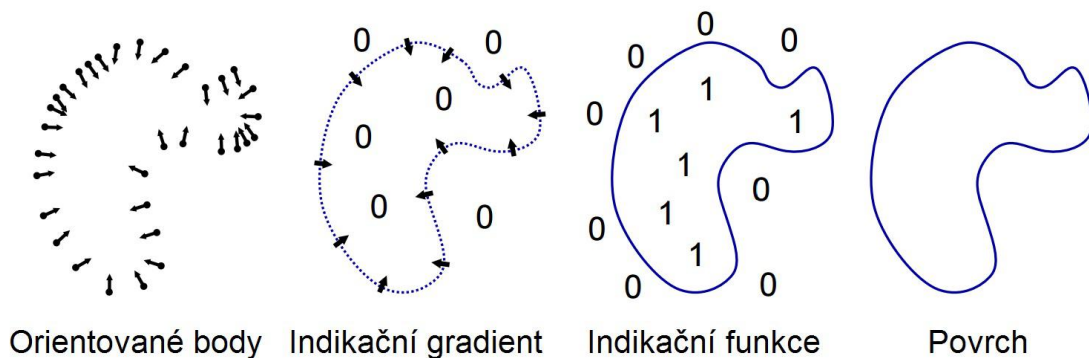
Protože algoritmus používá již existující body z mračna ve výsledné rekonstrukci, šum má velký dopad na výsledek rekonstrukce.

Hlavní parametr algoritmu je poloměr koule. Kvalita rekonstrukce je na poloměru silně závislá. Větší poloměr způsobí zvýšení počtu děr a ztrátu detailu. Příliš malý poloměr může způsobit, že se další bod nenalezne a rekonstrukce vůbec neproběhne[6],[3].

2.2 Poisson surface reconstruction

Poisson surface reconstruction řeší problém rekonstrukce povrchu použitím modelu založeného na implicitní funkci, specificky vypočítáním trojrozměrné indikační funkce (definované jako 1 pro body uvnitř modelu a 0 pro body venku) a následně vyextrahováním vhodného povrchu.

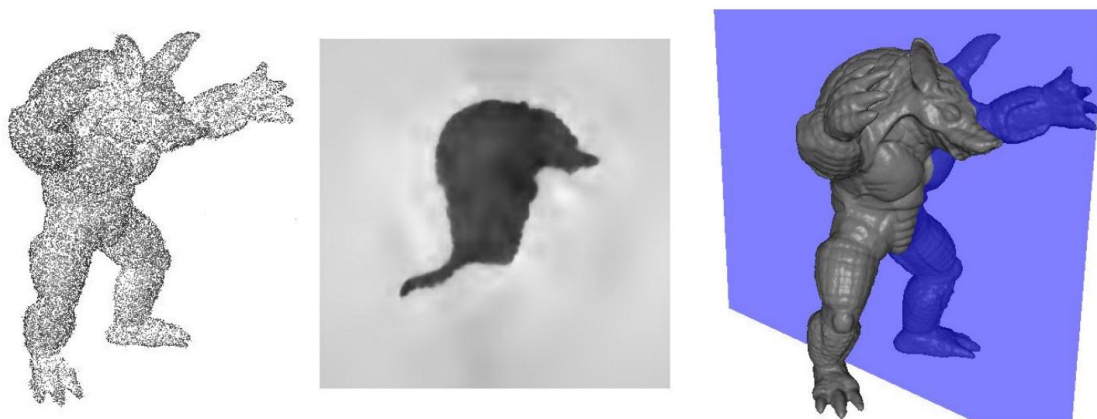
Hlavní poznatek je, že existuje vztah mezi mračnem orientovaných bodů a indikační funkcí modelu. Specificky, gradient indikační funkce je vektorové pole, které je nula skoro všude, kromě bodů poblíž povrchu, kde se rovnají dovnitř mířícím normálám povrchu (obrázek 2.3). Proto je možné brát orientované body jako gradient indikační funkce, což redukuje problém na najetí skalární funkce, jejíž gradient nejlépe aproximuje vektorové pole. Tento problém se následně přetransformuje na standardní Poissonovu úlohu: výpočet skalární funkce, jejíž Laplace (divergence gradientu) se rovná divergenci vektorového pole (Diagram rekonstrukce je vyobrazen na obrázku 2.2).



Obrázek 2.2: Diagram částí rekonstrukce. Převzato z:[5]

Použití Poissonovy rekonstrukce má několik výhod. Algoritmus nerozděluje povrch na segmenty, ale používá data jako celek, což algoritmu umožňuje vytvořit hladké povrchy, a také dobře aproximuje data obsahující šum.

Hlavním parametrem algoritmu je hloubka oktalového stromu, který je použit na konci algoritmu. Hloubka D produkuje výsledný model o rozlišení $2^D \times 2^D \times 2^D$. Větší hloubka zajistí větší rozlišení, ale i větší časovou a paměťovou náročnost. Základní hodnota je 8[5],[3].



Obrázek 2.3: Vizualizace indikační funkce na modelu Armadillo. Převzato z:[5]

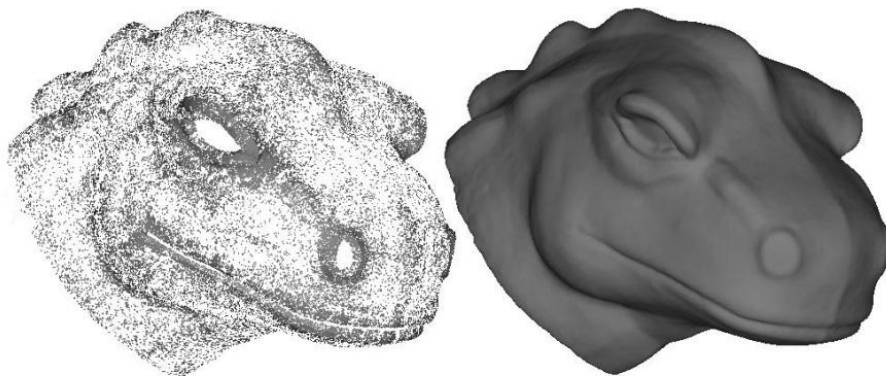
2.3 Fourier surface reconstruction

Fourier surface reconstruction je založena na použití integrálního počtu, který poskytuje jednoduchou metodu pro rekonstrukci z orientovaných mračen bodů.

Metoda je založena na faktu, že orientované mračno bodů poskytuje přesně dostatek informací pro výpočet plošného integrálu. To znamená, že se řešení rekonstrukce povrchu dá formulovat jako prostorový integrál. Poté je aplikován Stokův teorém, který umožní přetransformovat objemové integrály na plošné a vypočítat diskrétní aproximaci z orientovaných bodů.

V praxi můžeme rozdělit metodu na tři hlavní části. Nejprve se vezmou postupně všechny body a k nim asociované normály, které jsou následně umístěny do voxelové mřížky

bez potřeby vytváření jakýchkoliv vztahů mezi body. Následně je na voxelovou mřížku aplikován integrační filtr. Tohle je provedeno rychle a efektivně za použití Fourierovi transformace. Nakonec je extrahován výsledek jako izopovrch z voxelové mřížky použitím standardních algoritmů (např. Marching Cubes). Ukázku vidíme na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Ukázka rekonstrukce modelu dinosauří hlavy. Převzato z:[2]

Fourierova rekonstrukce zajišťuje vytvoření uzavřených a vodotěsných modelů bez ohledu na kvalitu vstupních dat.

Hlavním parametrem algoritmu je rozlišení voxelové mřížky použité pro rekonstrukci. V ideálním případě by měla mít hodnotu $2n$, kde n je přirozené číslo. Zvýšení hodnoty zlepší kvalitu rekonstrukce, spolu s časem a pamětovou náročností[2].

2.4 Wavelet surface reconstruction

Wavelet surface reconstruction je rychlá, efektivní a jednoduchá metoda rekonstrukce, která kombinuje výhody implicitních metod a techniky vícevrstevných struktur založených na vlnkách k rekonstrukci povrchu z orientovaných mračen bodů.

Základem je výpočet indikační funkce, která se poté převede na výsledný povrch. K jejímu výpočtu se nepoužívají standardní globálně podporované funkce (jako například používá Fourierova metoda). Místo toho je uplatněno rozdělení povrchu na hierarchicky uspořádané vlnkové báze, což vede k tomu, že každý bod ovlivňuje pouze malý počet koeficientů indikační funkce. To vede k výpočetně efektivnějšímu algoritmu. Ukázku vidíme na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Ukázka rekonstrukce modelu Davida. Převzato z:[4]

Kvalita výsledné rekonstrukce následně závisí na typu použité vlnkové báze. Výběr závisí na typu použití a ovlivňuje kvalitu/hladkost povrchu spolu s časem rekonstrukce. Základní typy, které kladou důraz na dobu rekonstrukce, jsou Haar a D4 Daubechies vlnky, přesto však poskytují dostatečné rozlišení výsledného modelu.

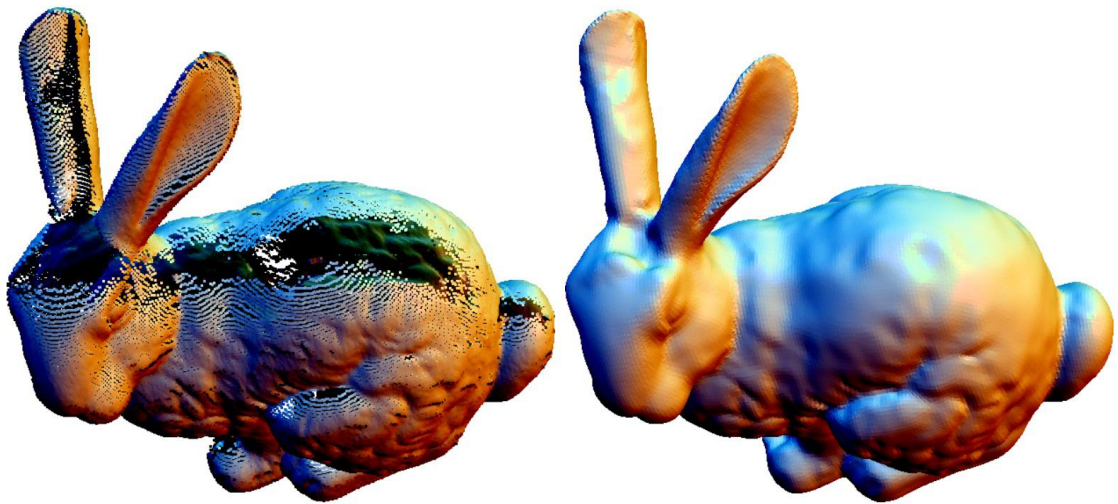
Hlavním parametrem algoritmu (po zvolení typu vlnky) je hloubka oktalového stromu, která ovlivňuje rozlišení při výpočtu povrchu z indikační funkce, což ovlivní výslednou kvalitu rekonstrukce spolu s časovou a paměťovou náročností[4].

2.5 Multi-level Partition of Unity implicits

Multi-level Partition of Unity implicits je metoda rekonstrukce povrchu z orientovaného mračna bodů. Svoje jméno získala podle toho, že jádro algoritmu obsahuje sadu vážených funkcí, které se rovnají jedné ve všech bodech povrchu.

Tato metoda se skládá ze tří základních kroků. Nejprve je povrch rozdělen na části a kvadratická funkce je použita na dané části povrchu. Funkce je negativní zvenku modelu a pozitivní uvnitř. Pokud je rekonstrukce části málo přesná, dělí se dále algoritmus se opakuje. Poté, jsou všechny části spojeny použitím vážené funkce – v článku nazváno partition of unity. Nakonec se vytvoří výsledný povrch použitím stromového rozdělení.

Algoritmus je také vybaven adaptivní aproximací funkce vzdálenosti od povrchu s kontrolovatelnou odchylkou, která je velice přesná poblíž povrchu. Ukázku vidíme na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Ukázka rekonstrukce modelu Stanford Bunny. Převzato z:[7]

MPU je konceptuálně jednoduchý, má jednoduchou implementaci a poskytuje rychlé a přesné rekonstrukce i z velkých mračen bodů. Čas rekonstrukce se odvíjí nejen od počtu bodů, ale i od complexity modelu.

Hlavním parametrem algoritmu je rozlišení, které nám umožňuje kontrolovat jemnost dělení v prvním kroku, čímž můžeme přesně nastavit kvalitu výsledné rekonstrukce [7].

Kapitola 3

Metriky

Pro účely testování bylo vybráno několik známých a jednoduchých metrik. Ty byly vypočítány z výsledných trojúhelníkových sítí.

3.1 Počet trojúhelníků

Nejjednodušší metrikou pro porovnání je výsledná velikost rekonstruované trojúhelníkové sítě. Tu získáme sečtením všech trojúhelníků. Větší velikost je předpokladem větší kvality, ale neznamená to však, že se trojúhelníková síť podobá původnímu povrchu, který mají algoritmy rekonstruovat.

3.2 Uzavřenost a genus

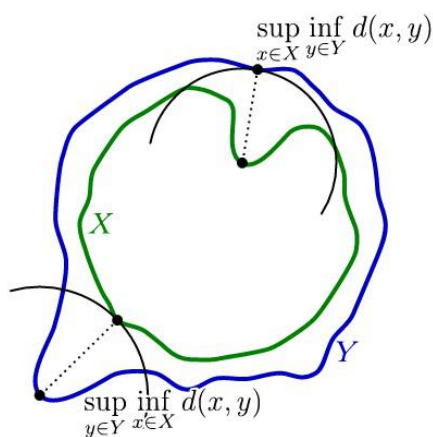
Tyto metriky označují topologické vlastnosti polygonálních modelů. Uzavřenost, neboli vodotěsnost poskytuje informace o tom, zda model obsahuje díry, tedy jestli je jeho povrch spojitý. Genus může nabývat hodnot přirozených čísel a říká, kolik "držadel" objekt obsahuje. Příkladem takových útvarů je například koule s genusem rovným nule, a "kobliha" s genusem rovným jedné.

3.3 Hausdorffova vzdálenost a kvadratický průměr

Hausdorffova vzdálenost měří, jaká je maximální vzdálenost mezi dvěma polygonálními modely. To se provede tak, že pro každý vrchol základního polygonálního modelu najdeme k němu nejbližší vrchol na cílovém (obrázek 3.1). Z tohoto seznamu všech vzdáleností se poté vybere ta maximální. To nám poskytne informaci o největší odchylce mezi dvěma modely. Diagram provedení ve 2D je zobrazen na obrázku 3.2.

$$d_H(X, Y) = \max\left\{\sup_{x \in X} \inf_{y \in Y} d(x, y), \sup_{y \in Y} \inf_{x \in X} d(x, y)\right\}$$

Obrázek 3.1: Vzorec pro výpočet Hausdorffovi vzdálenosti. Převzato z: [8]



Obrázek 3.2: Diagram Hausdorffovi vzdálenosti ve 2D. Převzato z:[8]

Kvadratický průměr (RMS) vypočítáme tak, že hodnoty nejprve umocníme na druhou, poté vypočítáme aritmetický průměr, který na konci zpětně odmocníme (obrázek 3.3). To způsobí, že hodnoty dále od nuly budou mít vyšší váhu ve výsledném průměru. Proto se v něm více projeví velké odchylky. Je vždy nezáporný a větší nebo roven aritmetickému průměru.

$$K = \sqrt{x^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$

Obrázek 3.3: Vzorec pro výpočet kvadratického průměru. Převzato z:[9]

Kapitola 4

Návrh testování

Testování proběhne v několika krocích, které otestují chování algoritmů v různých podmínkách. To zahrnuje následující kategorie:

- Různá velikost vstupních dat
- Různé hustoty orientovaných bodů v různých částech mračna
- Data obsahující šum
- Mračna obsahující chybějící data
- Nekompletní modely
- Modely s genusem větším než nula
- Více modelů v jednom souboru
- Provázaný model
- Ostré hrany

Pro tyto účely je použito několik modelů, které jsou dále upraveny pro potřeby jednotlivých testů:

- Armadillo
- Stanford bunny
- Happy Budha
- Torus
- Knot

Následně aplikujeme implementace rekonstrukčních algoritmů na již připravené sady dat. Při jejich průběhu změříme časovou a paměťovou náročnost. Poté z výsledných trojúhelníkových sítí vypočítáme další metriky, které nám poskytnou další informace o jejich kvalitě. Jedná se o:

- Počet trojúhelníků

- Hausdorffova vzdálenost, viz Kap. 3.3
- Kvadratický průměr (RMS)

Nakonec provedeme vyhodnocení, které se skládá jak z vizuální části, tak z interpretace naměřených metrik.

4.1 Testovací sada dat

Jako vstupní data byly v tomto projektu použity volně dostupné modely různých vlastností.

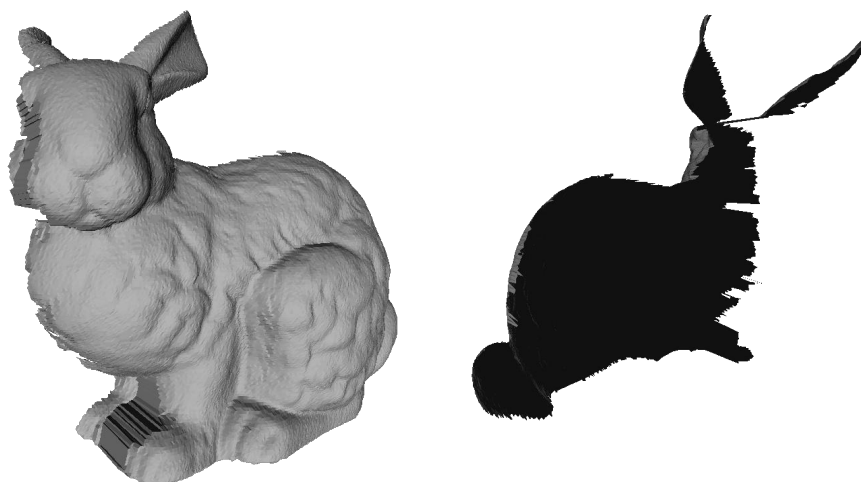
Primární úpravy a následné testování proběhlo na třech modelech, které byly staženy z repozitáře Stanfordské univerzity.

První použitý model má název Happy Buddha (Buddha) a vyobrazuje náboženskou postavu Budhy (obrázek 4.1). Jedná se o model reálného objektu z roku 1996, jehož velikost je $20\text{cm} \times 8\text{cm} \times 8\text{cm}$. Výsledný model byl spojen dohromady z šedesáti různých skenů a je složen z 543652 orientovaných bodů a 1087716 trojúhelníků. Model je vodotěsný, ale díky nedostatečně dokonalému skenování je jeho topologický genus větší, než původního objektu. Povrch je rozmanitý, obsahuje jak jemné detaily (např. záhyby pláště), tak velké hladké plochy (např. břicho, záda a podstavec). Dále obsahuje různé hustoty mračna na různých částech modelu (např. podstavec má několikrát menší hustotu než detailnější části). V poslední řadě se jedná o model s velkým počtem orientovaných bodů. Všechny tyto vlastnosti dělají model vhodným pro základní testování. Model byl stažen ve formátu PLY.



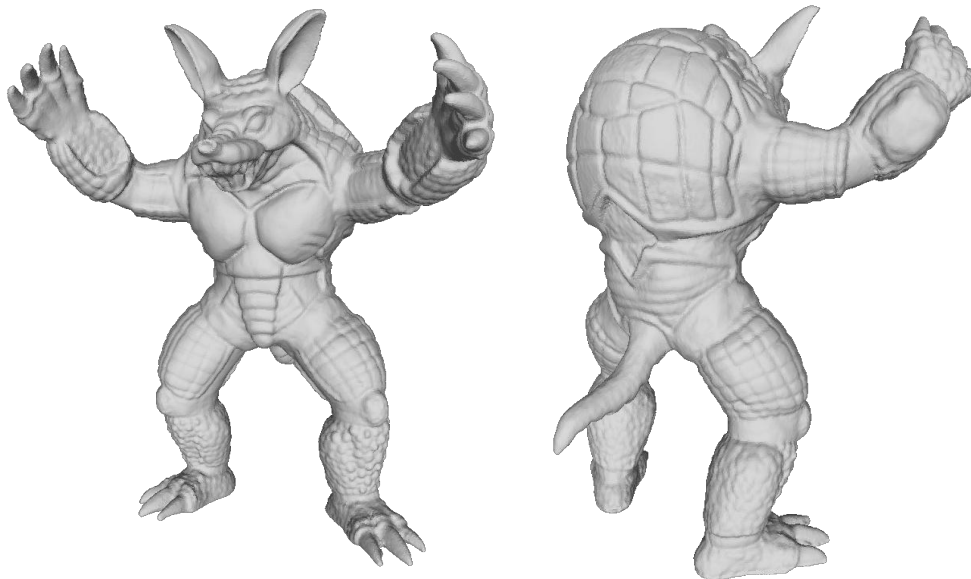
Obrázek 4.1: Přední a zadní strana modelu Buddha

Následuje model s názvem Stanford bunny (Bunny), který vyobrazuje slavného Stanfordského zajíčka (obrázek 4.2). Jedná se o model reálného objektu z roku 1993, jehož velikost je $16\text{cm} \times 12\text{cm} \times 11\text{cm}$. V této práci je použit jeho nekompletní model, získaný naskenováním jeho přední strany. Model obsahuje 40256 orientovaných bodů, a 79 312 trojúhelníků. Model byl stažen ve formátu PLY.



Obrázek 4.2: Přední a zadní strana modelu Bunny

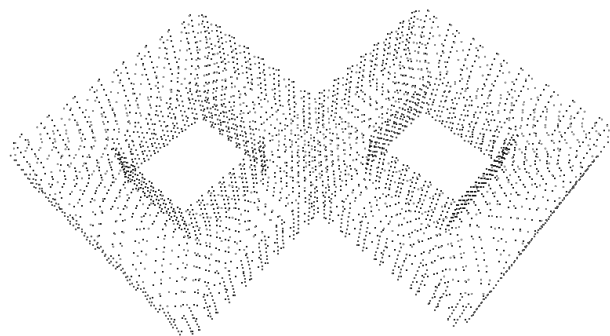
Poslední použitý model ze Stanfordského repozitáře má název Armadillo (Armadillo) a vyobrazuje bytost podobající se pásovcí (obrázek 4.3). Jedná se o model reálného objektu z roku 1996, jehož rozměry jsou $15\text{cm} \times 13\text{cm} \times 11\text{cm}$. Výsledný model byl spojen dohromady ze sedmdesáti různých skenů a je složen z 172974 orientovaných bodů a 345944 trojúhelníků. Jedná se o vodotěsný model, jehož genus je roven nule. Povrch je rozmanitý, obsahuje jak jemné detaily i hladké plochy. Hustota orientovaných bodů je uniformní a po celém modelu nabývá jen malých výchylek. Model byl stažen ve formátu PLY.



Obrázek 4.3: Přední a zadní pohled na model Armadillo

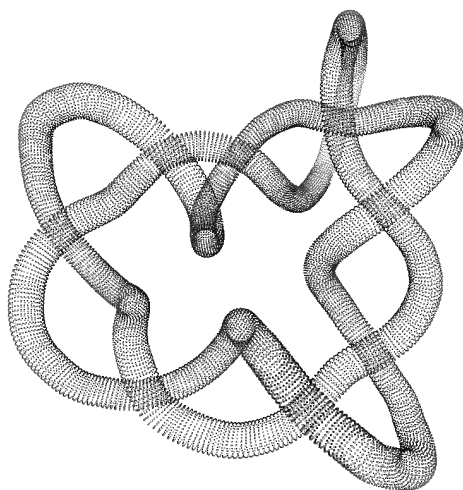
Poté jsou v této práci použity dvě další mračna, které jsou dostupné spolu s implementací algoritmu MPU a jsou vhodné pro pokročilé testování.

První použité mračno s názvem Torus (Torus) obsahuje torus s genusem rovným dvěma (obrázek 4.4). Mračno bylo uměle vygenerováno a skládá se z 4352 orientovaných bodů. Mračno bodů je navrženo tak, aby obsahovalo rovné povrchy a ostré hrany. Model byl stažen ve formátu PWN.



Obrázek 4.4: Mračno Torus

Druhé použité mračno s názvem Knot (Knot) vyobrazuje zauzlený torus s genusem rovným jedné (obrázek 4.5). Mračno bylo uměle vygenerováno a neobsahuje povrch, pouze 28659 orientovaných bodů. Model byl stažen ve formátu PWN.



Obrázek 4.5: Mračno Knot

4.1.1 Vstupní data různých velikostí a hustoty

Nezákladnějším faktorem, který ovlivňuje kvalitu výsledné rekonstrukce je velikost vstupního polygonálního modelu. Je tedy důležité otestovat jak algoritmy dokáží zrekonstruovat původní povrch i z modelů horší kvality. Proto zjednodušíme model Buddha na různé úrovně. Pro tento úkon použijeme filtr Quadric edge collapse decimation dostupný v aplikaci Meshlab.

Happy Budha obsahuje v základu 543652 orientovaných bodů. Tento model je lineárně zjednodušen na kvality 20% (BudhaDown4), 40% (BudhaDown3), 60% (BudhaDown2), a 80% (BudhaDown1), což nám poskytne spolu s originálem pět mračen různých velikostí (obrázek 4.6).

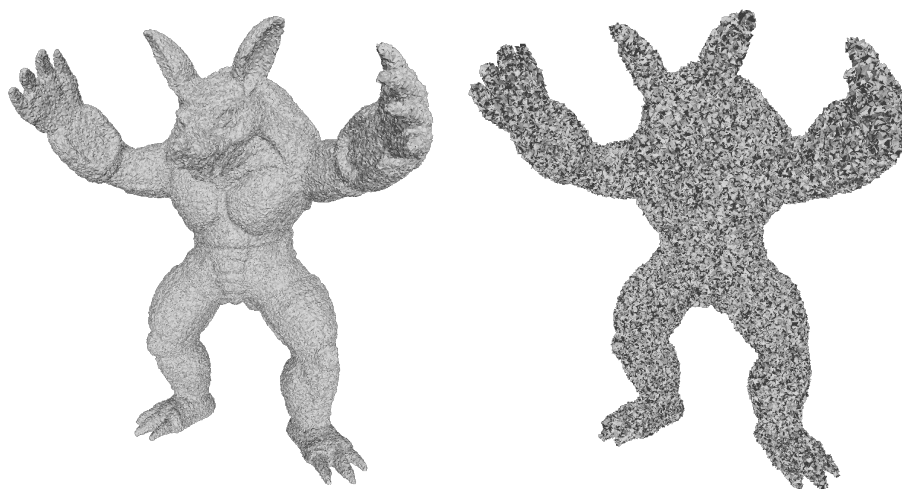
Další příhodnou vlastností modelu Buddha je, že různé části jeho povrchu obsahují různé hustoty orientovaných bodů. Jeho podstavec, břicho a záda mají velmi malou hustotu v porovnání s ostatními částmi. To jej v základu dělá vhodným pro takový test a není třeba pro tyto účely model dále upravovat.



Obrázek 4.6: Mračno Buddha a zjednodušené mračno BuddhaDown4

4.1.2 Šum

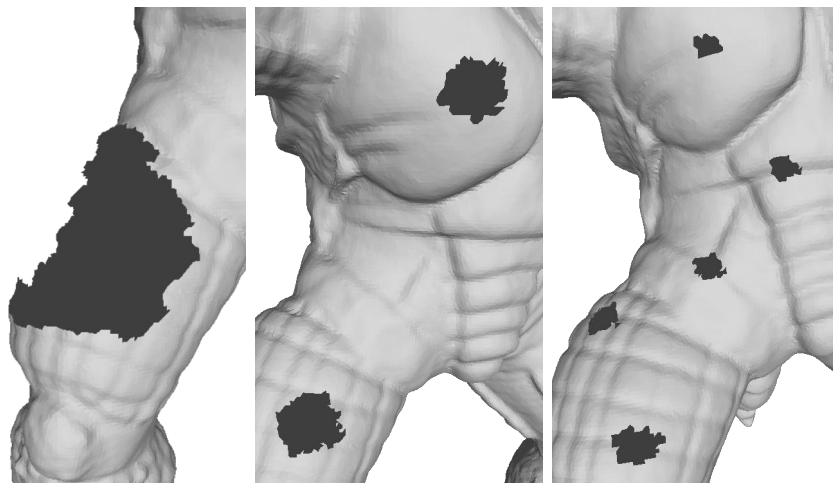
Šum se objevuje ve většině dat a vzniká použitím nedostatečně přesných přístrojů při skenování původního objektu a také patří k základním faktorům, které ovlivňují kvalitu výsledného povrchu. Proto je nezbytnou součástí testovací sady. Pro tyto účely byl zvolen polygonální model Armadillo. Model byl ponechán v základní kvalitě a následně na něj byly aplikovány tři různé úrovně šumu (obrázek 4.7). Pro tento účel byl použit filtr náhodného přesunu bodů v aplikaci Meshlab, který vezme každý bod mračna a přesune ho na jinou náhodnou souřadnici v kruhovém okolí původního bodu o specifikovaném poloměru. Na tento model byly aplikovány tři úrovně šumu o náhodném posunu 0,6 mm (ArmNoise1), 1,2 mm (ArmNoise2) a 2,4 mm (ArmNoise3).



Obrázek 4.7: Zašuměný model ArmNoise1 a ArmNoise3

4.1.3 Chybějící data

Dalším nezbytným faktorem, který ovlivňuje výslednou kvalitu rekonstrukce jsou chybějící data. Některá místa v polygonálním modelu mohou obsahovat díry různé velikosti například v důsledku nenaskenování reálného objektu ze všech úhlů. Jako v předchozím bodě, použijeme k těmto účelům model Armadillo, z něhož vytvoříme tři upravené modely (obrázek 4.8). V prvním odstraníme velkou část modelu z oblasti levé nohy (ArmMiss1), v druhém odstraníme menší část ze dvou míst na levé noze a břichu (ArmMiss2) a ve třetím odstraníme velice malé části z pěti míst také na levé noze a břichu (ArmMiss3).



Obrázek 4.8: Chybějící data v modelech ArmMiss1, ArmMiss2 a ArmMiss3

4.1.4 Nekompletní model

V některých případech, data modelu nejsou kompletní. Taková situace může vzniknout buď z nedostatku skenů nebo je žádoucí rekonstrukce pouze jedné strany objektu. K tomuto testování použijeme polygonální model Bunny bez dalších úprav, který již obsahuje pouze přední stranu modelu.

4.1.5 Torus a ostré hrany

Další oblastí, se kterou mohou mít algoritmy problém, jsou objekty, které mají genus větší než nula, což znamená, že nejsou topologicky identické s koulí. Otestujeme, zda algoritmy neuzavřou žádné díry, tedy ponechají hodnotu genusu na stejné hodnotě. Základním takovým tvarem je torus. V našem případě použijeme torus, jehož genus je roven dvěma.

Teto mračo obsahuje ještě další užitečnou vlastnost vhodnou pro testování. A to že se jeho povrch skládá z rovin, které jsou spojeny ostrými hranami. Otestujeme tedy, zda i po rekonstrukci bude výsledný model obsahovat ostré hrany, roviny a nebude příliš zašuměný nebo vyhlazený.

4.1.6 Provázaný model

Posledními daty, kterými se budeme pracovat, je mračo uniformní hustoty reprezentující zauzlený torus. Pro tento účel použijeme mračo Knot. To obsahuje torus s genusem rovným jedné, který je ale provázaný tak, že tvoří uzel. To nám umožní otestovat, zda algoritmy některé části nepropojí.

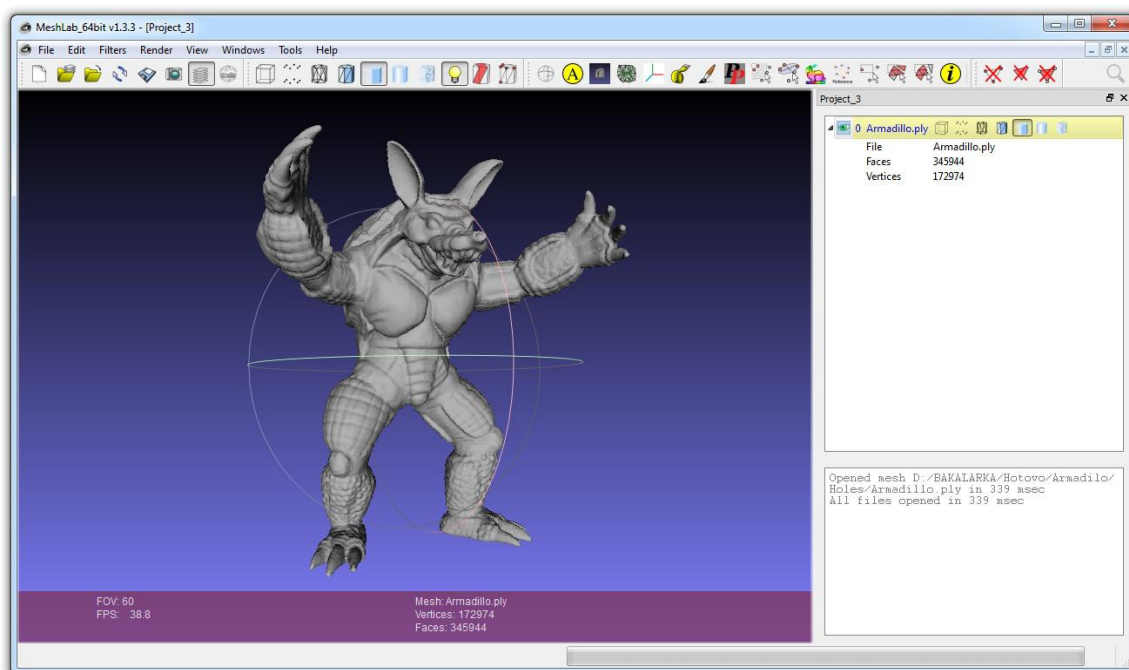
Kapitola 5

Praktická realizace

V této kapitole si blíže popíšeme použité nástroje, použité implementace rekonstrukčních algoritmů, konverzi formátů, vytvořené skripty a měření časové a paměťové náročnosti.

5.1 Použité nástroje

V této práci byla pro většinu úkonů použita volně dostupná aplikace Meshlab (obrázek 5.1). Podporuje velké množství vstupních a výstupních formátů a byly v ní provedeny veškeré úpravy modelů a mračen jako například odstranění bodů a přidání šumu. Aplikace zobrazuje počty trojúhelníků a bodů testovaných modelů. Dále poskytuje filtry pro výpočet Hausdorffovy vzdálenosti, RMS[1] nebo pro zjištění topologických a geometrických vlastností. V poslední řadě byla použita i pro samotnou rekonstrukci (algoritmus BPA), který v sobě přímo obsahuje.



Obrázek 5.1: Základní okno aplikace Meshlab zobrazující model Armadillo

5.2 Konverze stažených dat

Všechny stažené modely byly překonvertovány do souboru typu PLY obsahujícím pouze orientované mračno bodů, což zajišťuje konzistentní startovní mračno vhodné pro další manipulaci. Stanfordské modely byly staženy již ve formátu PLY, proto jediný úkonem bylo odstranění povrchu a uložení.

Modely stažené spolu s algoritmem MPU jsou uloženy v nestandardním formátu PWN, formát je však velice podobný běžnému formátu XYZ. Proto byl vytvořen jednoduchý skript pro konverzi, jehož výsledek byl následně načten do aplikace Meshlab a exportován do formátu PLY. Po převodu všech modelů do formátu PLY, je možné mračna dále upravit. Jakmile je mračno připraveno k testování, je exportován do souborů formátu OBJ a PLY.

Implementace jednotlivých rekonstrukčních algoritmů vyžadují různé vstupní formáty. Poisson a Fourier vyžadují na vstupu formát PLY a Wavelett formát OBJ. Algoritmus BPA je integrován v aplikaci Meshlab, a proto funguje na kterémkoliv formátu, který aplikace podporuje. V poslední řadě aplikace algoritmu MPU vyžaduje jako vstupní formát PWN. Stejně jako v předchozím případě byl pro konverzi naprogramován jednoduchý skript, tentokrát však pro převod formátu z OBJ do PWN.

Výstupní formáty algoritmů s výjimkou MPU spadají do formátu PLY nebo OBJ, které jsou dostačující pro vyhodnocení a nepotřebují další konverze. Výstup MPU je v nestandardním formátu POLY, který se ale opět velice podobá formátu PLY. Další skript je tedy vytvořen pro provedení potřebného převodu.

5.3 Implementace test. algoritmů

Implementace algoritmů pocházejí z různých zdrojů a mají různou podobu. Pro zjednodušení testování algoritmů rekonstrukce několika mračen najednou jsou použity skripty.

Implementace Ball Pivoting Algorithm je obsažena v aplikaci Meshlab. Proto funguje na všech vstupních formátech, které podporuje aplikace. Všechny její parametry se dají interaktivně přímo nastavit. Stejně jako její vstup i výstup je možné vyexportovat do jakéhokoli podporovaného formátu.

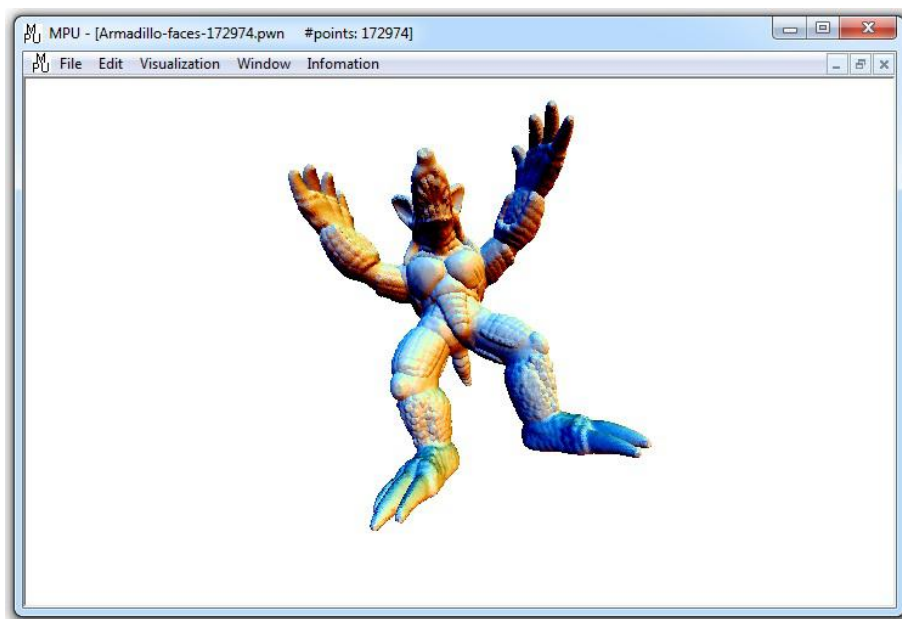
Poisson surface reconstruction je dostupný ve formě samostatné aplikace pro příkazovou řádku (SSDRecon.SSE2.exe). Na vstupu vyžaduje formát PLY, a stejně tak ho vrací na výstupu. Všechny parametry rekonstrukce se nastavují přes argumenty aplikace. Pro urychlení je vytvořen dávkový soubor, který obsahuje příkazy pro hromadnou rekonstrukci orientovaných mračen.

Fourier surface reconstruction je stejně jako Poisson dostupný formě samostatné aplikace pro příkazovou řádku (Reconstruct3D.exe). Na vstupu vyžaduje formát PLY, a stejně tak ho vrací na výstupu. Parametry se nastavují přes argumenty aplikace. Pro hromadnou rekonstrukci je vytvořen dávkový soubor.

Wavelett surface recontruction je dostupný ve formě čtyř samostatných aplikací pro příkazovou řádku. První aplikace (objtopts.exe) vyžaduje na vstupu soubor ve formátu OBJ, který je následně převeden do formátu PTS. Druhá aplikace (sortpoints.exe) jej následně seřadí. Poté se aplikuje samotná rekonstrukce pomocí waveletpiperecon.exe. Typy vlnek a hloubka jsou nastaveny argumenty. Na výstupu je soubor obsahující trojúhelníkovou síť, který se ve finální fázi převede z formátu BOBJ na OBJ. Pro rekonstrukci hromadnou i jednotlivých modelů je vytvořen dávkový soubor.

MPU je dostupný ve formě samostatné okénkové aplikace (MPU.exe) pro Windows (obrázek 5.2). Jako vstup jsou vyžadovány soubory formátu PWN a výsledný model je

možné vyexportovat ve formátu POLY. Všechna nastavení algoritmu se provádějí přímo v aplikaci, která je také vybavena grafickým rozhraním.



Obrázek 5.2: Základní okno aplikace MPU zobrazující model Armadillo

5.4 Měření časové a paměťové náročnosti

Posledními daty použitými pro porovnání je časová a paměťová náročnost. Oba údaje byli měřeny při průběhu rekonstrukčního algoritmu.

Implementace rekonstrukčních algoritmů mají různé formy, proto se lišil i způsob měření doby jejich průběhu. Implementace Ball Pivoting Algorithm je obsažena v aplikaci Meshlab, která přímo poskytuje časovou hodnotu. Stejně tak implementace Fourier surface reconstruction, MPU a Wavelet surface reconstruction poskytují samostatně tuto hodnotu po dokončení rekonstrukce. Výpočet doby trvání Poisson surface reconstruction byl manuálně přidán do dávkového souboru tak, že se odečetly hodnoty aktuálního času po dokončení a před startem programu.

Paměťová náročnost značí, jaké bylo maximální využití RAM paměti při průběhu rekonstrukce. Díky rozdílným implementacím algoritmů, by bylo velice obtížné a pro naše potřeby zbytečné zjistit tuto hodnotu s velkou přesností. Proto byly hodnoty pro toto testování orientačně odečteny z správce úloh systému Windows s přesností zaokrouhlenou na MB.

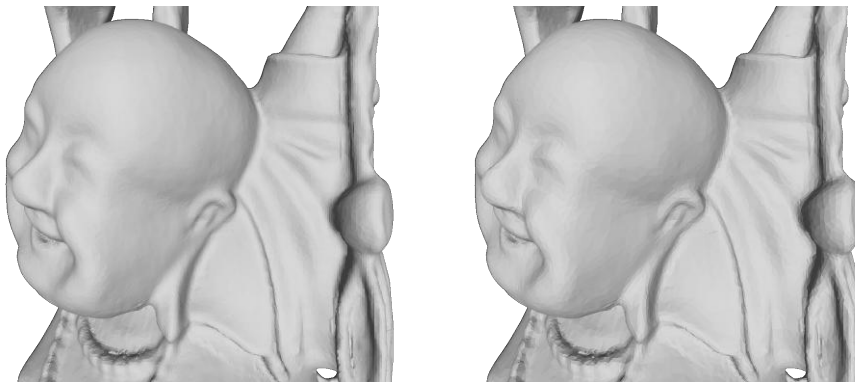
Kapitola 6

Vyhodnocení

V této kapitole provedeme navržené testy, výsledky algoritmů nejprve porovnáme vizuálně, podíváme se na kvalitu rekonstruovaných trojúhelníkových sítí a zjistíme, zda obsahují díry, tvoří artefakty a další specifické kvality. Dále použijeme naměřené metriky, které následně interpretujeme s ohledem na vizuální poznatky. Nakonec poskytneme souhrn všech testů.

6.1 Vstupní data různých velikostí a hustoty

V tomto prvním testu zaměříme na to, jak přesně dokáží testované algoritmy rekonstruovat původní povrch z vstupních dat různých velikostí a hustoty (obrázek 6.8 a 6.12). Test je proveden na modelu Buddha a jeho zjednodušených verzí BuddhaDown4, BuddhaDown3, BuddhaDown2 a BuddhaDown1 (obrázek 6.1). Parametry algoritmů byly nastaveny tak, aby se kvalita výsledného modelu co nejvíce blížila kvalitě původního modelu, ze kterého bylo vytvořeno testovací mračno.



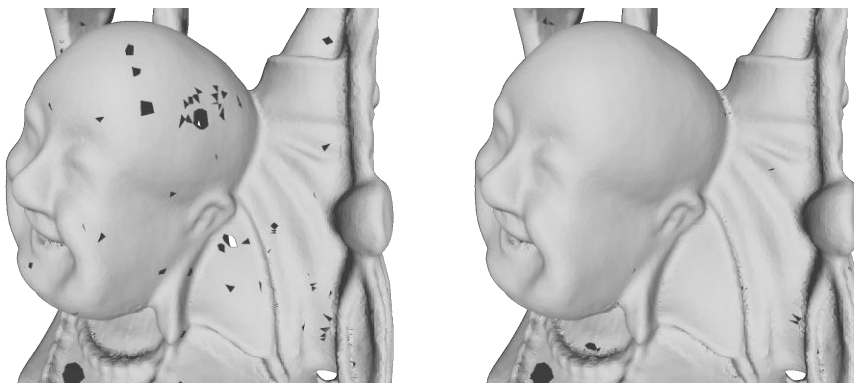
Obrázek 6.1: Detail originálního povrchu Buddha a BuddhaDown4

První testovaný algoritmus je BPA a prvním poznatkem při jeho použití je potvrzení, že výsledná kvalita je silně závislá na zvolení korektních parametrů algoritmu. To je odvozeno od toho, že algoritmus pracuje pouze s existujícími body a žádné další nevytváří. Pokud tedy zvolíme parametr poloměru koule příliš malý, rekonstrukce vůbec neproběhne. Zvolením příliš velkého poloměru docílíme rapidního zhoršení kvality. To však není dostačující pro docílení nejlepšího výsledku, jelikož různé části mračna bodů mají rozdílnou hustotu. Proto je ideální rozdělit rekonstrukci do dvou nebo více průchodů, pokaždé s jiným průmě-

rem koule. To zajistí, že většina částí s malou hustotou, které byly vynechány při prvním průchodu bude uzavřena.

V našem testování jsme proto použili dva průchody algoritmu. Průměr koule byl nastaven na 0,46 mm - 0,92 mm pro mračno bodů Buddha, 0,63 mm - 1,30 mm pro BuddhaDown1, 0,80 mm - 1,60 mm pro BuddhaDown2, 0,97 mm - 1,95 mm pro BuddhaDown3 a 1,15 mm - 2,23 mm pro BuddhaDown4.

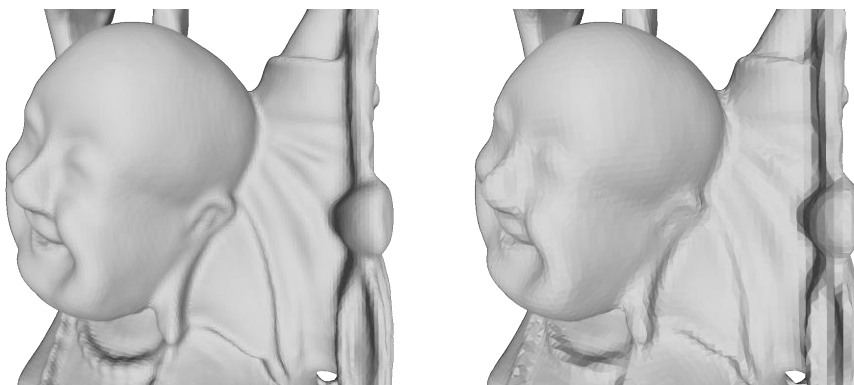
I pro dvou průchodech, nechává BPA na na výsledném modelu značný počet děr, což je nežádoucí a velice zhoršuje výslednou kvalitu. Tyto díry nejdou vyplnit dalšími průchody a musel by se použít externí algoritmus pro jejich vyplnění. Po bližším prozkoumání je však vidět, že BPA poskytuje dobrou rekonstrukci pro hladké povrchy uniformní hustoty. Většina děr se vyskytuje buď v ostrých ohybech a nebo v místech, ve kterých hustota bodů nebyla ideální pro ani jeden z průchodů (obrázek 6.9 a 6.13). Rekonstrukce ostrých ohybů je další slabou stránkou BPA. Protože algoritmus používá již existující body, je pro něj velice obtížné propojit body identicky k původnímu povrchu. Srovnání rekonstrukce originálu a zjednodušeného modelu je vidět na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Detail povrchu Buddha a BuddhaDown4 po rekonstrukci algoritmem BPA

Následuje test Poisson surface reconstruction. Hloubka oktalového stromu byla nastavena na hodnotu devět pro mračna bodů Buddha, BuddhaDown1 a BuddhaDown2 a na hodnotu osm pro mračna BuddhaDown3 a BuddhaDown4.

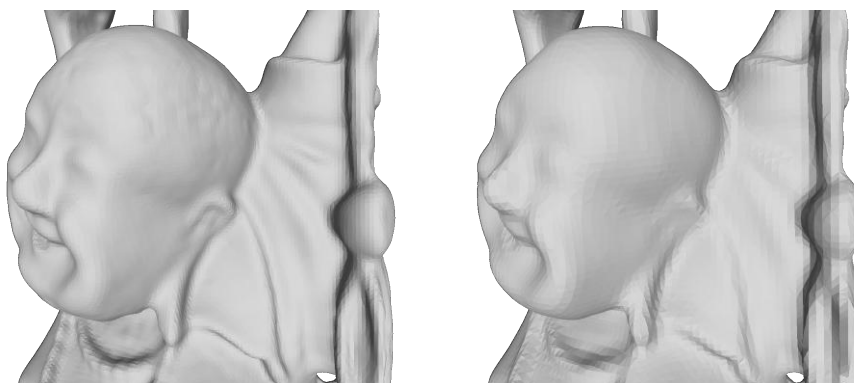
Poisson poskytuje kvalitní výsledek. Model neobsahuje žádné díry a napodobuje původní povrch velice dobře. Bez problému zvládá různou hustotu mračna bodů (obrázek 6.9 a 6.13). Jedinou zaznamenanou nevýhodou v tomto testu je, že příliš vyhlazuje povrch, což způsobuje ztrátu ostrosti výsledných polygonálních modelů. Srovnání rekonstrukce originálu a zjednodušeného modelu je vidět na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3: Detail povrchu Buddha a BuddhaDown4 po rekonstrukci algoritmem Poisson

Pro testování Fourier surface reconstruction bylo rozlišení nastaveno na 529 pro mračno bodů Buddha, 512 pro BuddhaDown1 a 448 pro BuddhaDown2, 384 pro BuddhaDown3 a 270 pro BuddhaDown4.

Stejně jako u Poisson surface reconstruction je kvalita většiny povrchu je na vysoké úrovni. Model je uzavřený a napodobuje původní povrch velice dobře. Problémy však nastávají při rekonstrukci oblastí s menší hustotou. Podstavec původního modelu má velmi nízkou hustotu v porovnání s ostatními oblastmi, což způsobí, že algoritmus "nedotáhne" povrch do požadované pozice (obrázek 6.10 a 6.14). Stejný problém, který je však méně viditelný nastává i u hladkých ploch s menší hustotou na trupu a zádech. Na těchto místech je odchylka největší. Na druhou stranu, protože ostré záhyby obsahují větší množství orientovaných bodů, je algoritmus velice přesný v těchto oblastech. Srovnání rekonstrukce originálu a zjednodušeného modelu je vidět na obrázku 6.4.

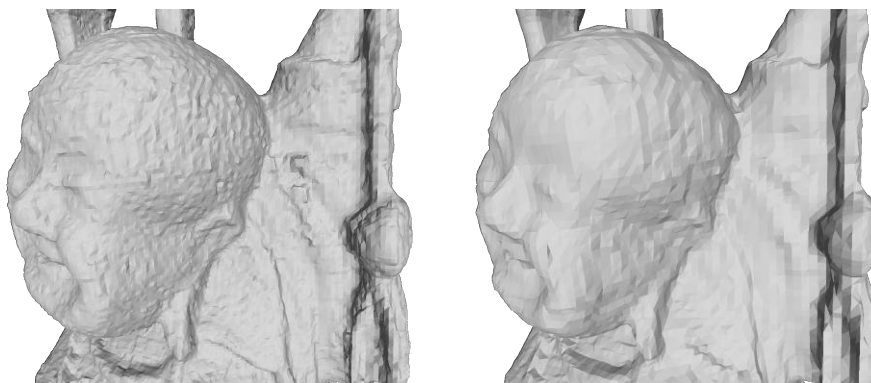


Obrázek 6.4: Detail povrchu Buddha a BuddhaDown4 po rekonstrukci algoritmem Fourier

Pro testování Wavelett surface reconstruction s vlnkami Haar i D4 Daubechies (Daub4) byla hloubka nastavena na hodnotu devět pro mračna bodů Buddha, BuddhaDown1 a BuddhaDown2 a na hodnotu osm pro mračna BuddhaDown3 a BuddhaDown4.

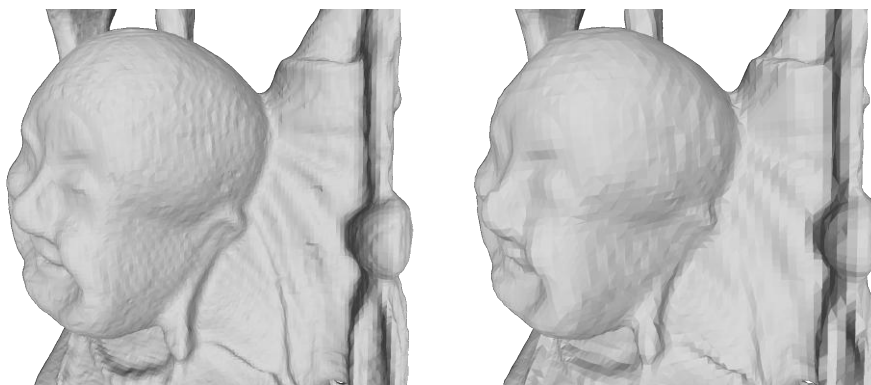
Na první pohled si můžeme všimnout velice rozdílných polygonálních modelů mezi vlnkami Haar a Daub4, sdílejí však několik základních vlastností. Oba modely jsou uzavřené a kvalita povrchu je stejná po celém povrchu bez ohledu na hustotu bodů. V obou modelech jsou jasně patrné "vlnky" prostupující celým povrchem, které nejsou žádoucí a snižují výslednou kvalitu. Zde však jejich podobnosti končí.

Vlnky typu Haar vnášejí do výsledných modelů velké množství nežádoucího šumu. To následně ovlivňuje negativním způsobem všechny části povrchu. To způsobuje tvorbu artefaktů na podstavci a ostrých záhybech spolu s nedokonalou rekonstrukcí hladkých povrchů (obrázek 6.11 a 6.15). Srovnání rekonstrukce originálu a zjednodušeného modelu je vidět na obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: Detail povrchu Buddha a BuddhaDown4 po rekonstrukci algoritmem Wavelett Haar

Vlnky typu Daub4 jsou v tomto testu lepší ve všech ohledech, díky mnohem méně zašuměnému povrchu (obrázek 6.11 a 6.15). To zlepšuje kvalitu ostrých záhybů i hladkých povrchů obrázek a snižuje počet artefaktů. Je také důležité poznamenat, že "vlnky" prostupující povrchem jsou zde více viditelné než u typu Haar. Srovnání rekonstrukce originálu a zjednodušeného modelu je vidět na obrázku 6.6.

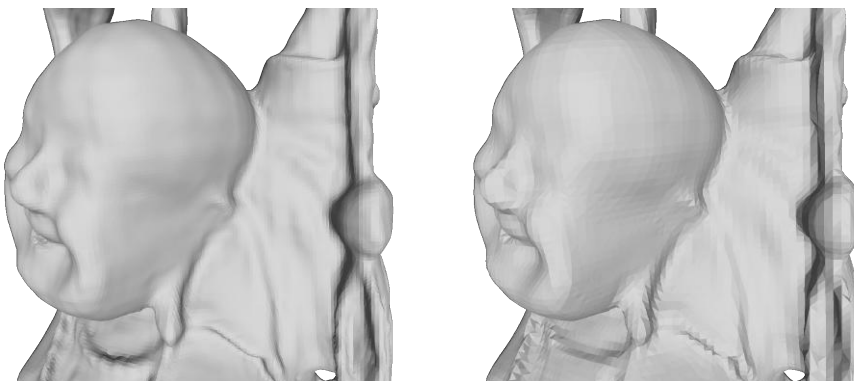


Obrázek 6.6: Detail povrchu Buddha a BuddhaDown4 po rekonstrukci algoritmem Wavelett Daub4

Pro testování MPU byla jemnost mřížky nastavena na hodnotu 0,4 mm pro mračno bodů Buddha, 0,5 mm pro BuddhaDown1, 0,7 mm BuddhaDown2, 0,8 mm pro BuddhaDown3 a 0,9 mm pro BuddhaDown4.

MPU poskytuje výsledný povrch dostatečné kvality. Model je uzavřený, bez viditelného šumu. Dobře aproximuje roviny, hladké povrchy a oblasti s různou hustotou dat (obrázek 6.10 a 6.14). Problém nastává při rekonstrukci ohybů a jemných detailů. MPU má velkou tendenci k přílišnému vyhlazení povrchu, jak můžeme vidět například na nohou nebo zádech.

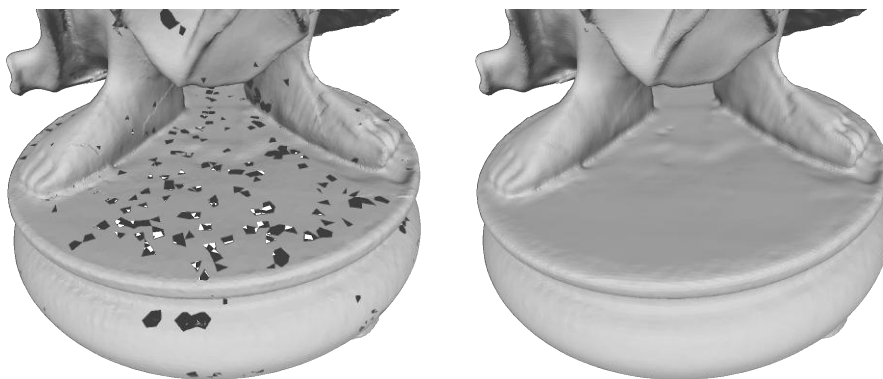
Dalším negativem je tvorba artefaktů na různých částech modelu. Srovnání rekonstrukce originálu a zjednodušeného modelu je vidět na obrázku 6.7.



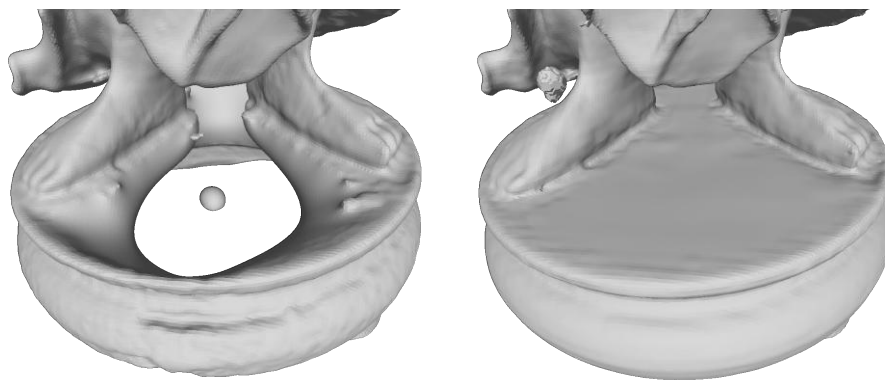
Obrázek 6.7: Detail povrchu Buddha a BuddhaDown4 po rekonstrukci algoritmem MPU



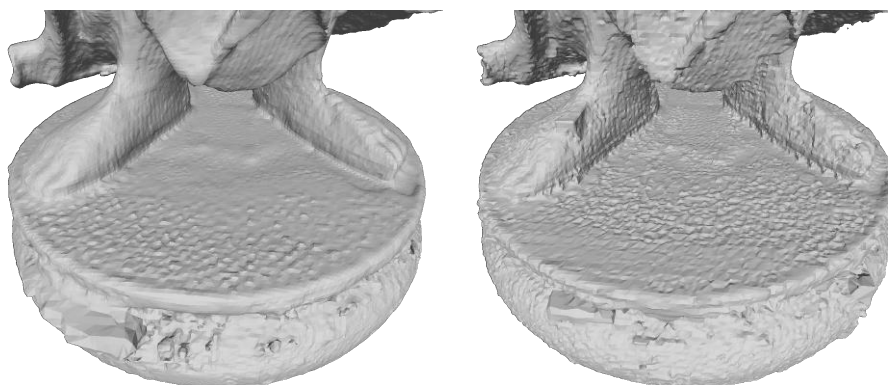
Obrázek 6.8: Detail originálního povrchu modelu Buddha s nízkou hustotou



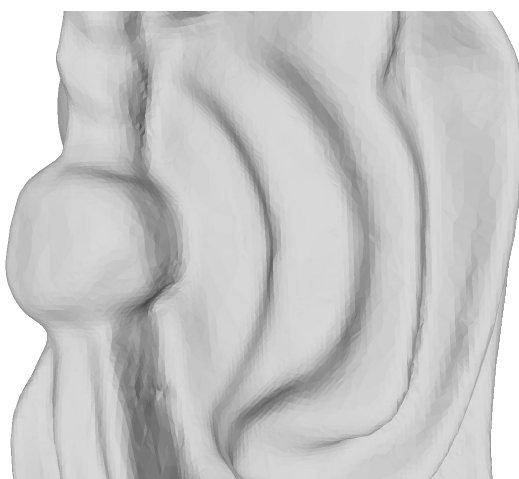
Obrázek 6.9: Detail povrchu modelu Buddha s nízkou hustotou po rekonstrukci algoritmy BPA a Poisson



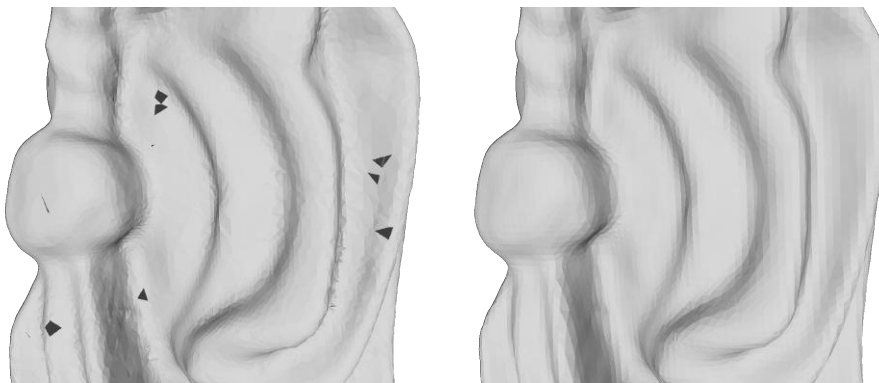
Obrázek 6.10: Detail povrchu modelu Buddha s nízkou hustotou po rekonstrukci algoritmy Fourier a MPU



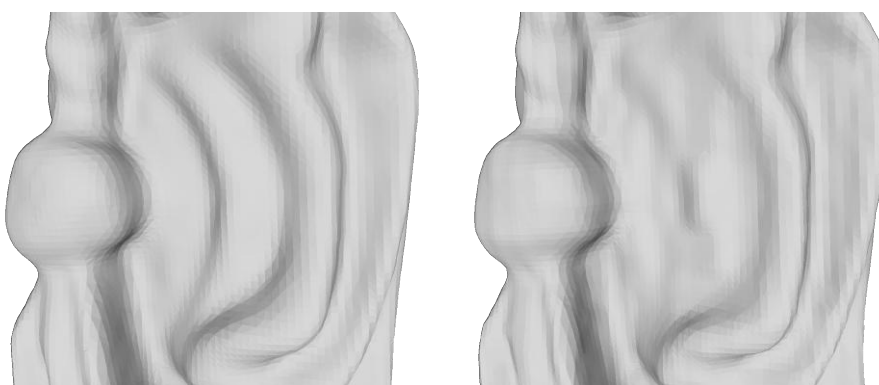
Obrázek 6.11: Detail povrchu modelu Buddha s nízkou hustotou po rekonstrukci algoritmy Wavelet Daub4 a Haar



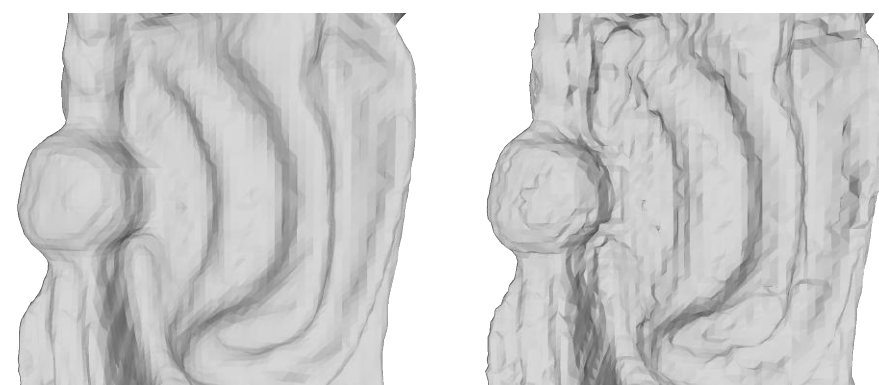
Obrázek 6.12: Detail originálního povrchu modelu Buddha s vysokou hustotou



Obrázek 6.13: Detail povrchu modelu Buddha s vysokou hustotou po rekonstrukci algoritmy BPA a Poisson



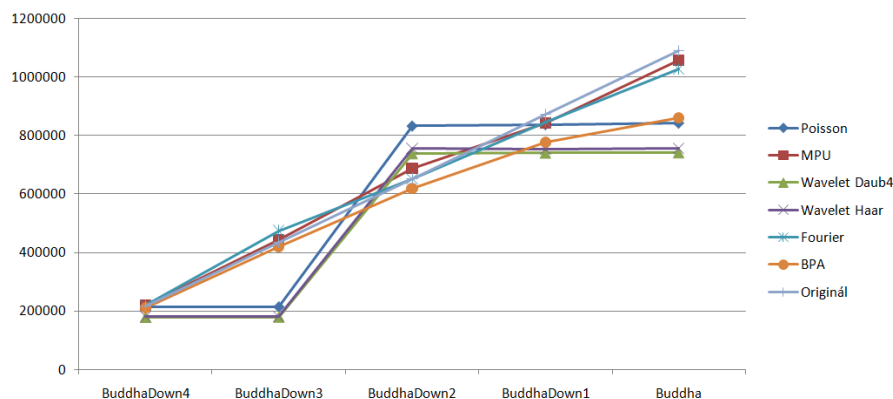
Obrázek 6.14: Detail povrchu modelu Buddha s vysokou hustotou po rekonstrukci algoritmy Fourier a MPU



Obrázek 6.15: Detail povrchu modelu Buddha s vysokou hustotou po rekonstrukci algoritmy Wavelet Daub4 a Haar

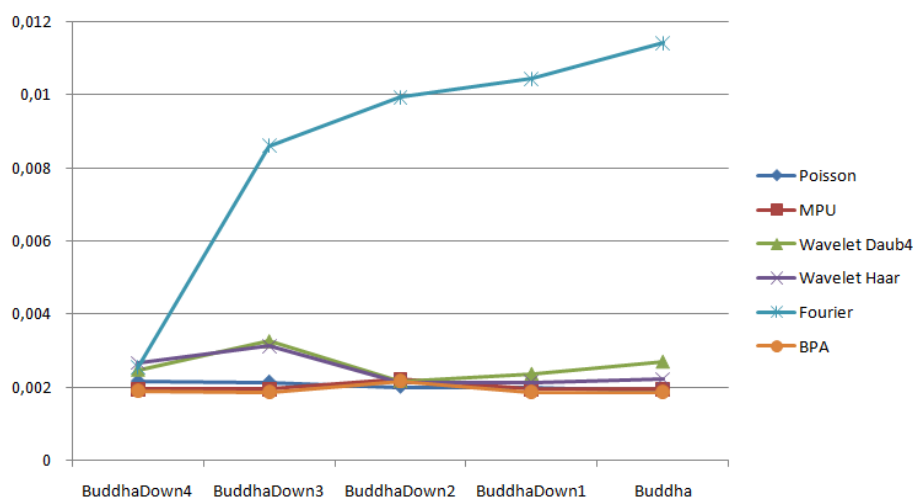
Následně se přesuneme k naměřeným metrikám a začneme srovnáním počtu trojúhelníků v rekonstruovaných modelech (obrázek 6.16). Jak můžeme vidět ve grafu, MPU, Fourier a BPA jdou nastavit tak, aby velikosti výsledných modelů byly velice podobné originálu při různých vstupních velikostech. U ostatních algoritmů takovou kontrolu nemáme. Hlavním

důvodem je, že vstupním parametrem Poisson a Wavelet surface reconstruction je hloubka, která může být pouze přirozené číslo, což nám neumožňuje přesně kontrolovat výslednou velikost.

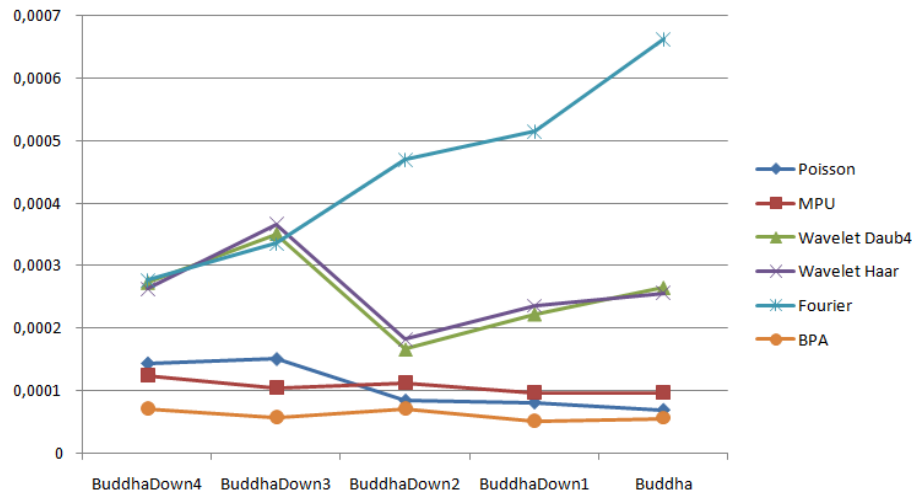


Obrázek 6.16: Graf počtu trojúhelníků

Následně se přesuneme k Hausdorffově vzdálenosti (obrázek 6.17) a kvadratickému průměru (obrázek 6.18). Oba grafy potvrzují naše poznatky z vizuálního porovnání. Fourier v těchto testech dopadl nejhůř kvůli tomu, že nedokonale zrekonstruoval části s malou hustotou, což vede k vysokým výsledným hodnotám. Také je důležité si všimnout, že Fourierův výsledek se zlepšuje, zatímco kvalita modelu se zhoršuje. To je způsobeno tím, že při zjednodušení mračna se nejprve odebírají body z oblastí větší hustoty, což ve výsledku zvyšuje uniformitu povrchu. To způsobí zlepšení rekonstrukce v oblastech s původně nižší hustotou. Dále následují oba typy Wavelet surface reconstruction, které byly velice zašuměné na všech velikostech. Nejlepších výsledků v tomto testu dosahují MPU, Poisson a BPA. Také ve grafech můžeme vidět skokové zlepšení kvality Poisson a Wavelet surface reconstruction, což je způsobeno nastavením parametru jak popsáno při srovnání výsledných velikostí.

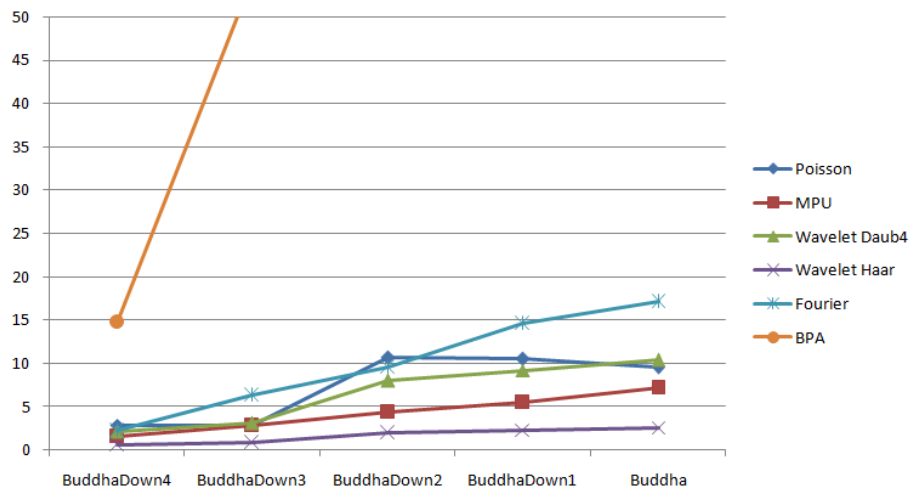


Obrázek 6.17: Graf Hausdorffovi vzdálenosti v centimetrech.



Obrázek 6.18: Graf RMS v centimetrech

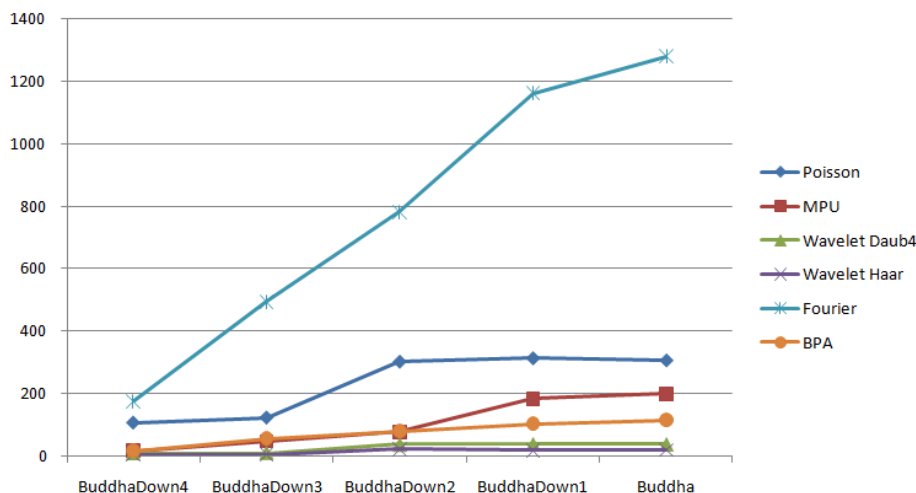
Dále při tomto testu, proběhlo měření času (obrázek 6.19). Jak můžeme vidět z následujícího grafu, všechny algoritmy spadají do lineární časové složitosti. Jednoznačně nejhorší výsledek má BPA, kterému trvala rekonstrukce originálního mračna přes tři minuty, z čehož vyplývá, že jeho časová efektivita je desetkrát horší v porovnání s jakýmkoliv dalším testovaným algoritmem. Poté následuje FFT s maximálním časem rekonstrukce 17 s, Wavelett Daub4 a Poisson s 10 s a MPU s 7s. Nejlepšího výsledku v tomto testu dosáhla rekonstrukce Wavelett Haar s maximálním časem 3s. Z grafu je také vidět, že Poisson a Wavelett surface reconstruction zaznamenaly skokový nárůst při zvýšení jejich hloubkového parametru u třech mračen s nejvyšším počtem bodů. Poisson je dokonce více časově efektivnější, když při dané hloubce má mračno větší velikost. Naproti tomu časová náročnost Wavelet surface reconstruction se neustále zvyšuje.



Obrázek 6.19: Graf časové náročnosti v sekundách

Poslední měření toho testu se zabývalo pamětovou náročností měřenou na několika velikostech modelu (obrázek 6.20). Stejně jako u měření časové složitosti, spadají pamětové náročnosti všech algoritmů pod lineární složitost. Tentokrát však nejhorší výsledek patří

Fourierovi, který při rekonstrukci originálního modelu potřeboval 1277 MB paměti, což znamená, že jeho paměťová efektivita je pětikrát horší než dalšího algoritmu v pořadí. Další algoritmy jsou opět mnohem blíže u sebe. Následuje Poisson s maximálním využitím 306 MB, MPU s 198 MB a BPA s 115 MB. Nejlépe však v tomto měření obstály obě varianty Wavelet s maximálním využitím paměti o velikosti 37 MB a 20 MB. Opět si můžeme všimnout, že jak Wavelety, tak Poisson skokově zvýšily svou náročnost při zvýšení hloubkového parametru.



Obrázek 6.20: Graf paměťové náročnosti v MB

6.2 Vstupní data uniformní hustoty s aplikovaným šumem

V této kapitole se zaměříme na otestování odolnosti algoritmů vůči šumu na vstupních datech uniformní hustoty. Testy byly provedeny na modelu Armadillo a jeho třech zašuměných verzích ArmNoise1, ArmNoise2 a ArmNoise3 (obrázek 6.21). Parametry programů byly nastaveny tak, aby se výsledná velikost co nejvíce blížila velikosti originálu.

Prvním testovaným algoritmem je BPA, pro rekonstrukci bylo použito dvou průchodů, poprvé s průměrem koule nastaveným na 1 mm a pro druhý průchod 2 mm.

BPA si na uniformním mračnu vede velice dobře (obrázek 6.22), počet děr je značně snížen, stále však neposkytuje přesnou rekonstrukci ostrých záhybů. Protože používá již existující body pro rekonstrukci, algoritmus by měl být velice náchylný na šum. To náš test potvrzuje (obrázek 6.25). Výsledný povrch je silně zašuměný, obsahuje díry a na některých místech má převrácené normály.

Následuje Fourier surface reconstruction, jehož parametr rozlišení byl pro tento test nastaven na hodnotu 352.

Fourier surface reconstruction poskytuje velice dobré výsledky při rekonstrukci uniformního mračna (obrázek 6.23), celý povrch je bez problémů zrekonstruován a neobsahuje žádné nežádoucí artefakty. Stále je však viditelné že výsledný povrch je příliš vyhlazený.

Odolnost vůči šumu je také na vysoké úrovni (obrázek 6.26). Šum z mračna není přenesen do výsledného modelu a povrch stále zachovává velké množství detailů.

Pokračujeme otestováním Poisson surface reconstruction. Hloubka oktalového stromu byla nastavena na hodnotu osm ve všech testech.

Výsledky na uniformním mračnu se velice podobají Fourier surface reconstruction. Povrch celého modelu je zrekonstruován bez problému a neobsahuje žádné artefakty (obrázek 6.22). Narozdíl od Fouriera není povrch natolik vyhlazen a jemné detaily jsou lépe viditelné.

Rekonstrukce zašuměných dat, reprezentuje tvar původního modelu s dobrou přesností, povrch je však nerovný a je v něm zřetelné, že původní data obsahovaly šum (obrázek 6.25).

Dále se přesuneme k otestování obou typů Wavelet surface reconstruction. Parametr hloubky byl nastaven na osm pro všechny testy obou typů.

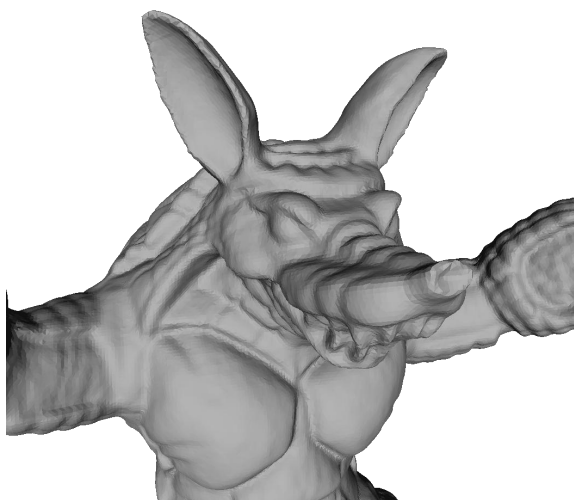
Rekonstrukce na uniformním mračnu Armadillo poskytují mnohem lepší výsledky než na předchozím testu s různou hustotou. Oba typy věrohodně napodobují originální povrch (obrázek 6.24). Daub4 však poskytuje jemnější rekonstrukci oproti vlnám Haar. "Vlnky" prostupující povrchem jsou však stále viditelné v obou případech.

Při rekonstrukci ze zašuměných dat poskytují oba typy neuspokojivé výsledky (obrázek 6.27). Snaží se napodobit mračno bodů do přílišných detailů, což vede k velkému šumu ve výsledném povrchu.

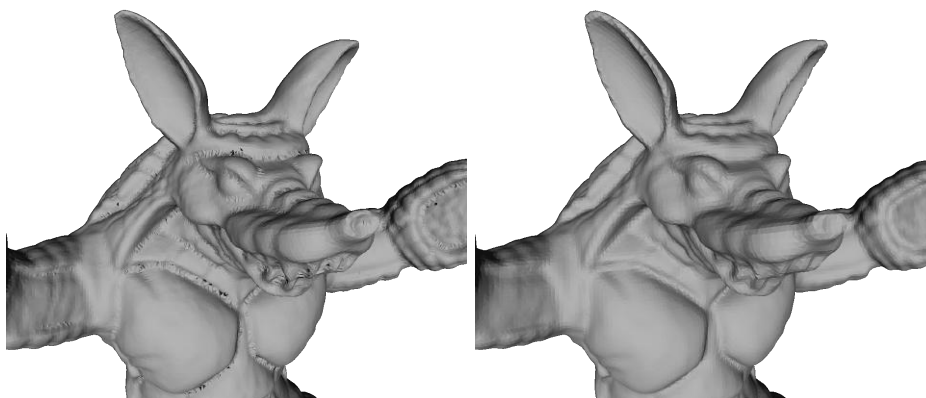
Posledním testovaným algoritmem je MPU. Jemnost mřížky při tomto testu byla nastavena 0,6 mm.

Rekonstrukce mračna Armadillo poskytuje na první pohled dobrý výsledek, stejně jako u modelu Buddha algoritmus silně vyhlazuje data, což vede ke ztrátě detailů (obrázek 6.23).

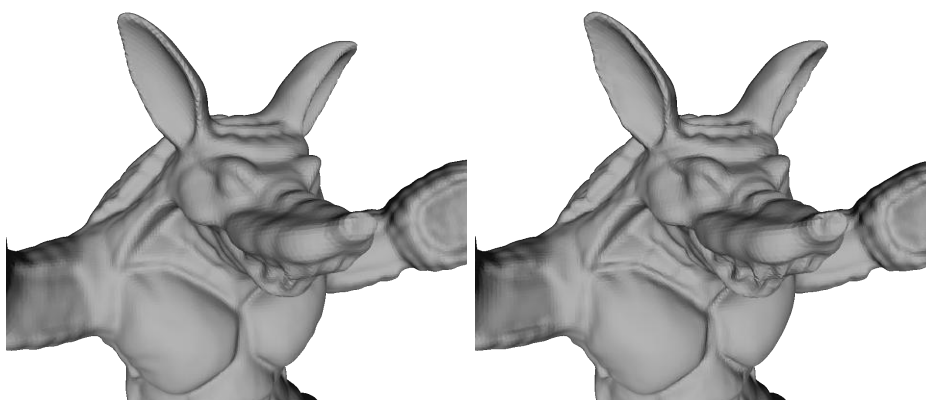
Rekonstrukce zašumění dat je neuspokojivá, stejně jako u Wavelet surface reconstruction se algoritmus snaží napodobit data příliš detailně, což způsobuje nepřesnou rekonstrukci (obrázek 6.26).



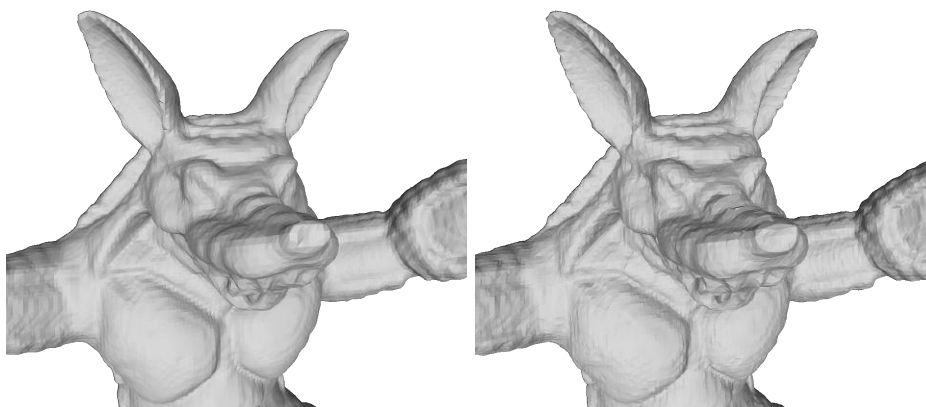
Obrázek 6.21: Detail originálního povrchu modelu Armadillo



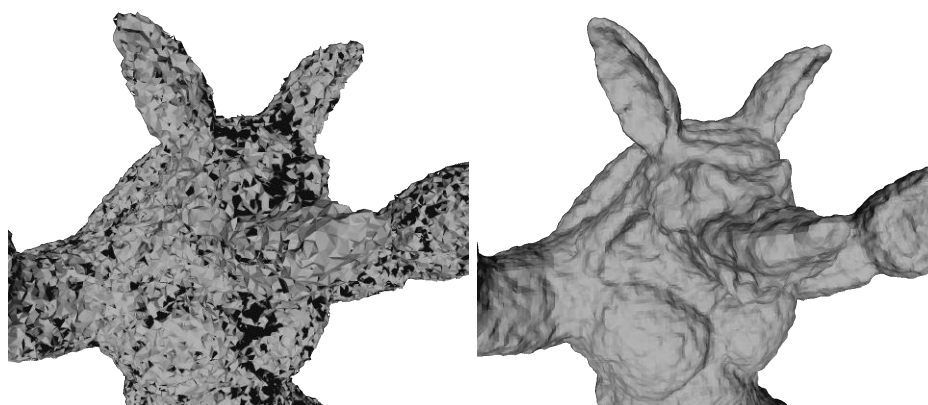
Obrázek 6.22: Detail povrchu modelu Armadillo po rekonstrukci algoritmy BPA a Poisson



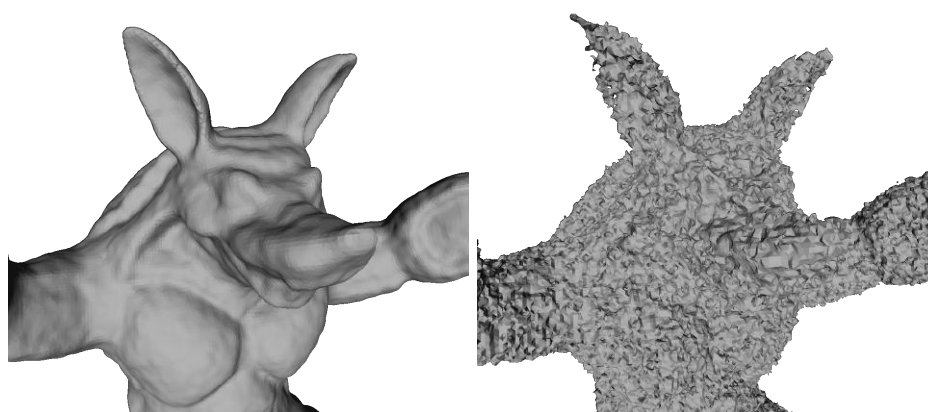
Obrázek 6.23: Detail povrchu modelu Armadillo po rekonstrukci algoritmy Fourier a MPU



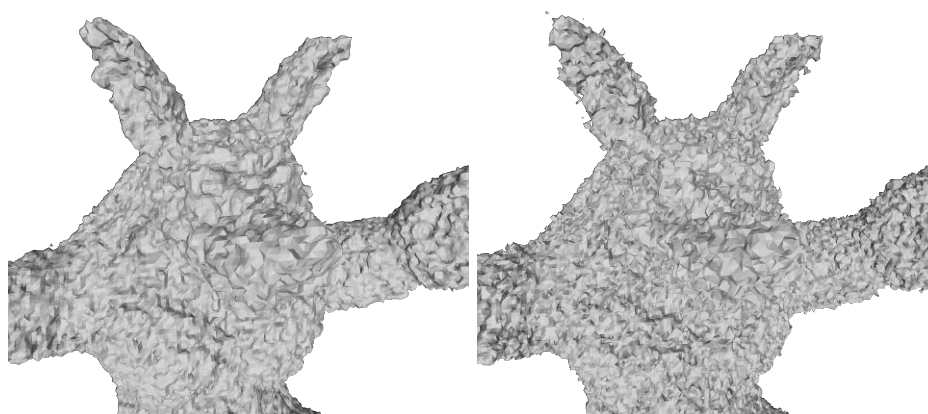
Obrázek 6.24: Detail povrchu modelu Armadillo po rekonstrukci algoritmy Wavelet Daub4 a Haar



Obrázek 6.25: Detail povrchu modelu ArmNoise3 po rekonstrukci algoritmy BPA a Poisson



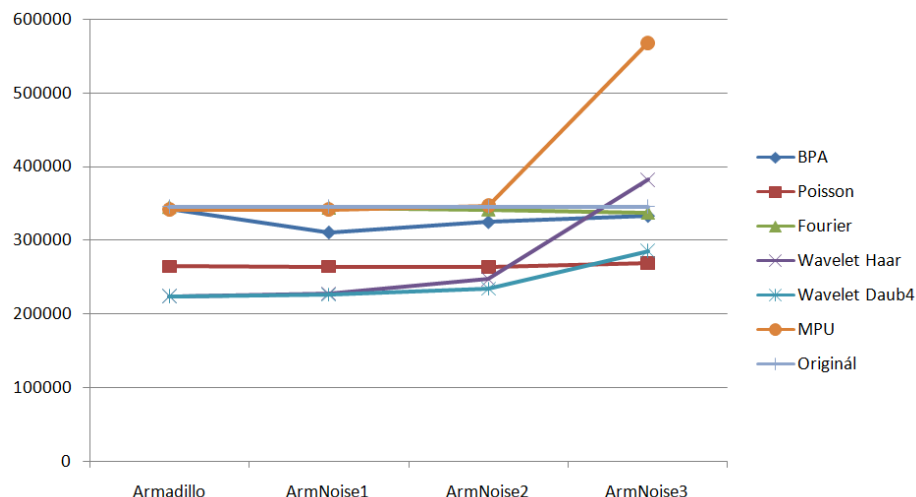
Obrázek 6.26: Detail povrchu modelu ArmNoise3 po rekonstrukci algoritmy Fourier a MPU



Obrázek 6.27: Detail povrchu modelu ArmNoise3 po rekonstrukci algoritmy Wavelet Daub4 a Haar

Následně se přesuneme k naměřeným metrikám a začneme srovnáním počtu trojúhelníků v rekonstruovaných modelech (obrázek 6.28). Jak můžeme vidět, algoritmy byly nastaveny tak, aby se výsledná velikost co nejvíce podobala originální. Tohle však není úplně možné

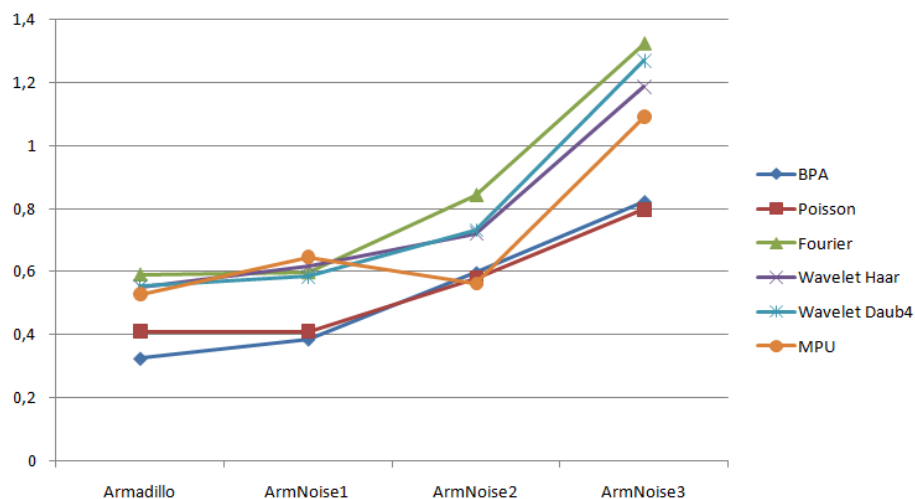
u Poisson a Wavelet surface reconstruction, kvůli nedostatečné jemnosti nastavení parametru. Při zavedení šumu, zůstává počet trojúhelníků u většiny algoritmů konstantní. MPU a oba typy Wavelet surface reconstruction však zaznamenávají nárůst, kvůli zašuměným výsledným povrchům.



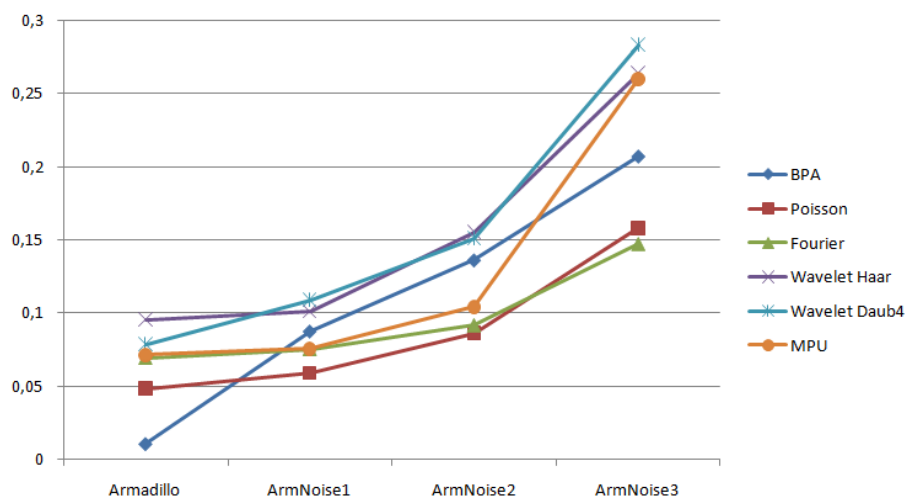
Obrázek 6.28: Graf počtu trojúhelníků

Na grafech Hausdorffovi vzdálenosti a kvadratického průměru (obrázek 6.29, 6.30) dále vidíme, že rekonstrukci základního mračna nejlépe zvládá BPA. Jak bylo již řečeno, algoritmus používá již existující body, a proto při rekonstrukci mračna uniformní hustoty dosahuje nejlepších výsledků. Stále však obsahuje díry a špatně rekonstruuje ostré hrany. Tyto skutečnosti se však v těchto grafech nejsou zachyceny. Dále následuje Poisson, což potvrzuje vizuální srovnání. Další algoritmy poskytují méně kvalitní výsledky z důsledku přílišného zašumění nebo vyhlazení.

Při aplikaci šumu, všechny algoritmy zaznamenají snížení kvality. Nejlepší výsledky očekávaně produkuje Poisson. Fourier má velmi malou kvadratickou odchylku v Hausdorffově vzdálenosti je však nejhorší. To je pravděpodobně způsobeno velkým vyhlazením, které dělá model poměrně přesným, detaily povrchu jsou však ztraceny. Dále z dat vypadá, že BPA poskytuje obstojné výsledky. To je způsobeno tím, že při použití původních bodů je přibližný tvar zachován, graf ale nezachycuje to, že povrch je velmi zašuměný a nekvalitní. Dále následuje MPU a Wavelet surface reconstruction s nejhoššími výsledky. To potvrzuje vizuální porovnání.

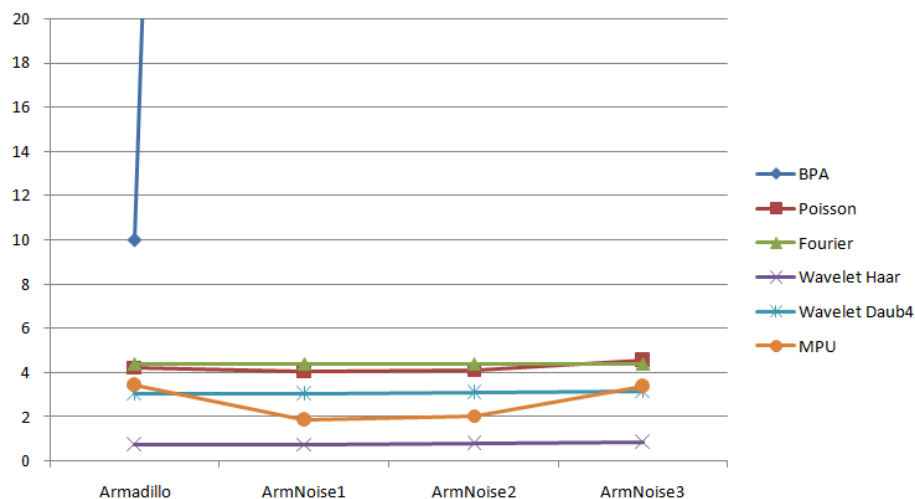


Obrázek 6.29: Graf Hausdorffovi vzdálenosti v milimetrech



Obrázek 6.30: Graf RMS v milimetrech

Nejlepší výsledky v časové náročnosti (obrázek 6.31) pak patří Wavelet surface reconstruction a MPU, po kterých následuje Fourier a Poisson. Jednoznačně nejhorší je pak BPA. Při zavedení šumu zůstává doba rekonstrukce většiny algoritmů konstantní. Výjimku tvoří BPA, jehož časová náročnost je až 350x horší než dalšího algoritmu v pořadí při rekonstrukci dat s nejvyšším obsahem šumu.



Obrázek 6.31: Graf časové náročnosti

6.3 Chybějící data

V této kapitole se zaměříme na otestování odolnosti algoritmů vůči chybějícím datům. Testy byly provedeny na třech verzích modelu Armadillo s chybějícími daty ArmMiss1, ArmMiss2 a ArmMiss3. Parametry programů byly nastaveny tak, aby se výsledná velikost co nejvíce blížila velikosti originálu.

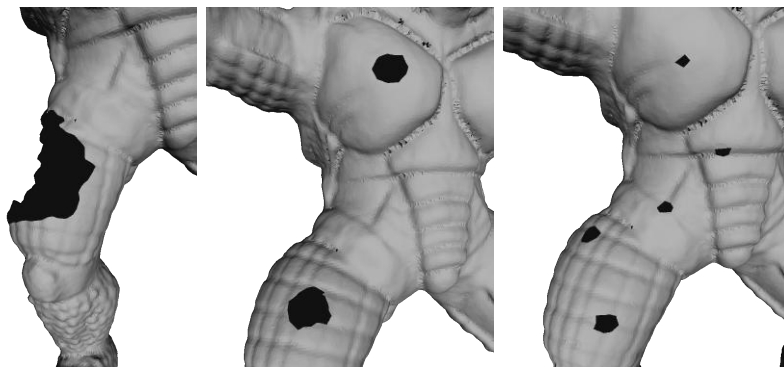
BPA poskytuje nedokonalé výsledky, protože potřebuje již existující body, které následně propojí. To způsobí, že i díry malé velikosti se nemohou vyplnit, a zůstanou ve výsledném modelu (obrázek 6.32).

Poisson surface reconstruction zvládá vyplnění malých a středních děr velmi dobře, u velké je však vidět, že povrch je prohnutý dovnitř (obrázek 6.33).

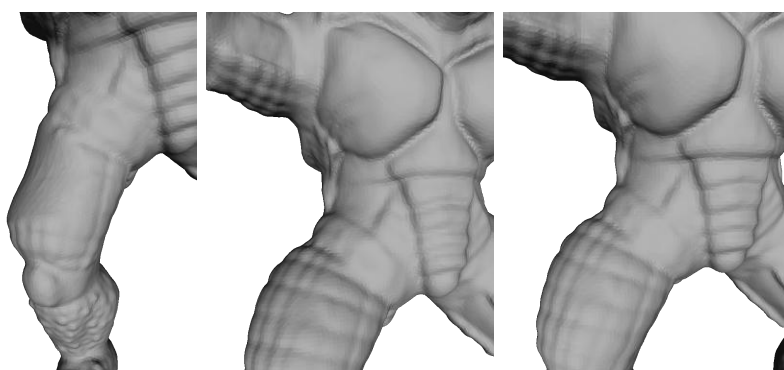
Fourier surface reconstruction podobně jako Poisson zvládá malé a střední díry velmi dobře, u velké je také vidět prohnutí povrchu dovnitř, které je ještě hlubší a hrany původní díry jsou mnohem znatelnější (obrázek 6.34).

Ani jeden typ Wavelett surface reconstruction neposkytuje uspokojivý výsledek. Ve všech třech případech můžeme v místech děr zaznamenat tvorbu hranatých artefaktů (obrázek 6.35 a 6.36).

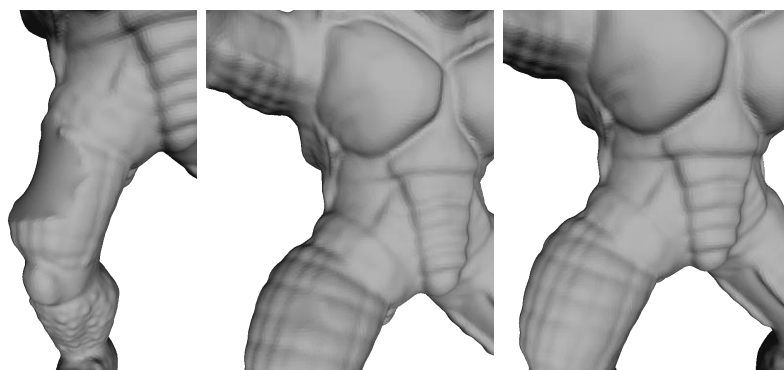
MPU poskytuje dobré překrytí malých a středních děr. Problém nastává u překrytí velké díry, kde můžeme vidět tvorbu artefaktu, který vyčnívá ven z modelu (obrázek 6.37).



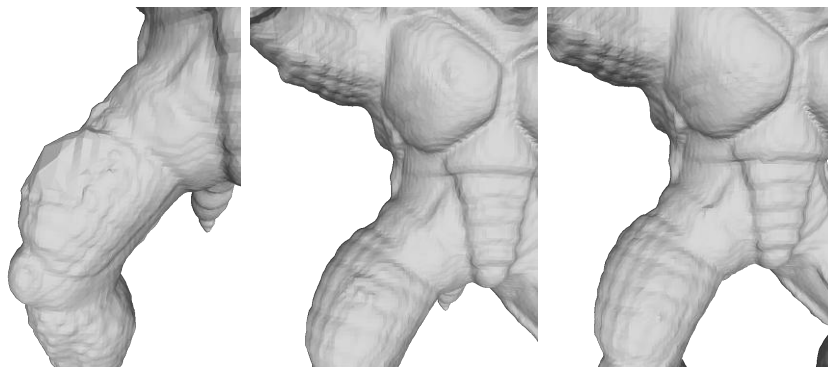
Obrázek 6.32: Rekonstrukce mračen ArmMiss1, ArmMiss2 a ArmMiss3 algoritmem BPA



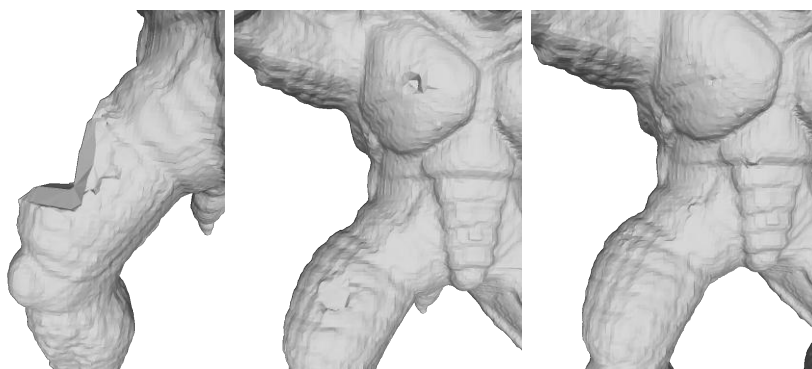
Obrázek 6.33: Rekonstrukce mračen ArmMiss1, ArmMiss2 a ArmMiss3 algoritmem Poisson



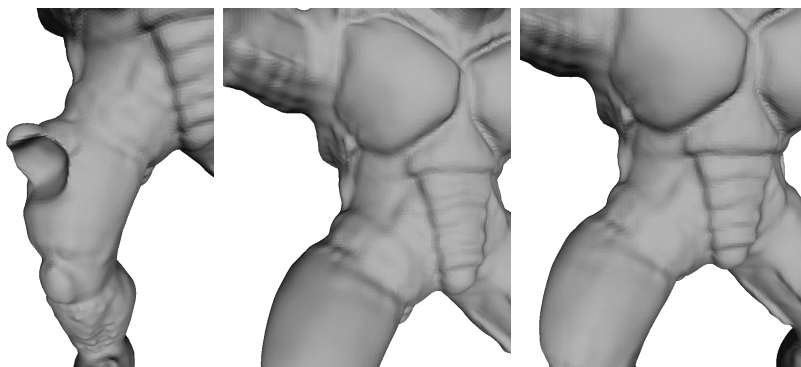
Obrázek 6.34: Rekonstrukce mračen ArmMiss1, ArmMiss2 a ArmMiss3 algoritmem Fourier



Obrázek 6.35: Rekonstrukce mračen ArmMiss1, ArmMiss2 a ArmMiss3 algoritmem Wavelet Daub4



Obrázek 6.36: Rekonstrukce mračen ArmMiss1, ArmMiss2 a ArmMiss3 algoritmem Wavelet Haar



Obrázek 6.37: Rekonstrukce mračen ArmMiss1, ArmMiss2 a ArmMiss3 algoritmem MPU

6.4 Nekompletní model

Dále se zaměříme na otestování chování algoritmů, pokud na vstupu není kompletní mračno. Test byl proveden na třech verzích modelu Bunny. Parametry programů byly nastaveny tak, aby se výsledná velikost co nejvíce blížila velikosti originálu.

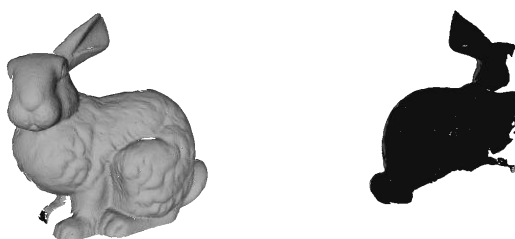
BPA stejně jako v testu s chybějícími daty, vynechá místa v mračnu, která neobsahují žádné body. Proto se zrekonstruuje pouze přední strana. Také je důležité si všimnout, že levé ucho nebylo dostatečně blízko u hlavního modelu, proto algoritmus tuto část celou vynechal (obrázek 6.38).

Poisson surface reconstruction zrekonstruoval výsledný model jako obtisk do čtvercového plátna. Kvalita přední strany má dobrou kvalitu, plátno je hladké a spojitě (obrázek 6.39).

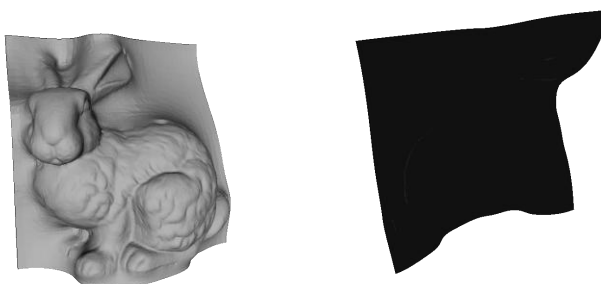
Fourier surface reconstruction by měla podle teorie vždy uzavřít výsledný model, což potvrzuje náš test. Přední strana je normálně zrekonstruována a zadní je spojitě a hladce uzavřena (obrázek 6.40).

Wavelett surface reconstruction poskytuje dva rozdílné výsledky. Typ Haar stejně jako Poisson obtiskne model do čtvercového plátna, to není hladké, ale obsahuje hranaté artefakty (obrázek 6.42). Typ Daub4 se také model snaží obtisknout, ten však zůstane zaklíněn v nežádoucím útvaru (obrázek 6.41).

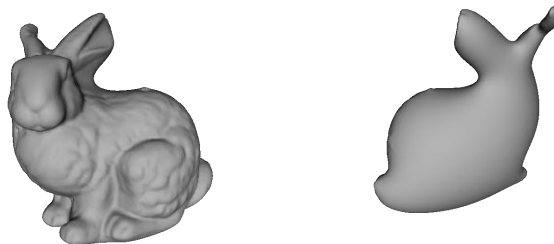
MPU poskytuje podobně jako Poisson rekonstrukci obtiskem do čtvercového plátna, to je však mnohem více obtáhnuto okolo modelu a zdeformované (obrázek 6.43).



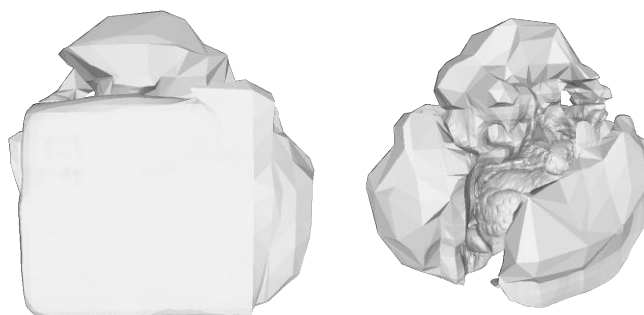
Obrázek 6.38: Rekonstrukce mračna Bunny algoritmem BPA



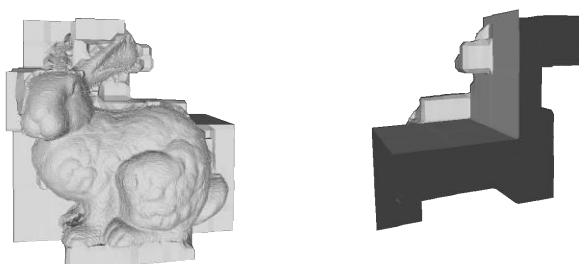
Obrázek 6.39: Rekonstrukce mračna Bunny algoritmem Poisson



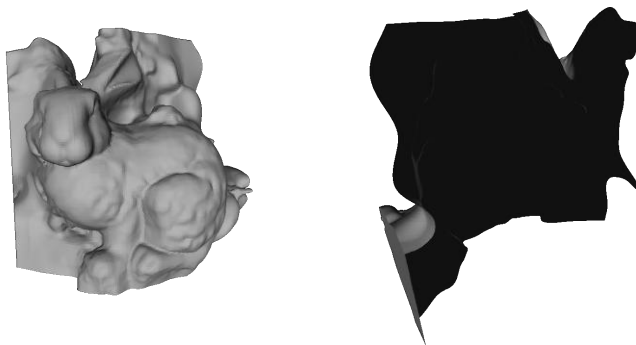
Obrázek 6.40: Rekonstrukce mračna Bunny algoritmem Fourier



Obrázek 6.41: Rekonstrukce mračna Bunny algoritmem Wavelet Daub4



Obrázek 6.42: Rekonstrukce mračna Bunny algoritmem Wavelet Haar



Obrázek 6.43: Rekonstrukce mračna Bunny algoritmem MPU

6.5 Torus, ostré hrany

Dále se zaměříme na otestování chování algoritmů, pokud mračno obsahuje ostré hrany a hladké povrchy. K tomu otestujeme, zda algoritmus ponechává genus modelu nezměněn, v našem případě roven dvěma. Test byl proveden na mračně Torus. Parametry programů byly nastaveny na základní hodnoty.

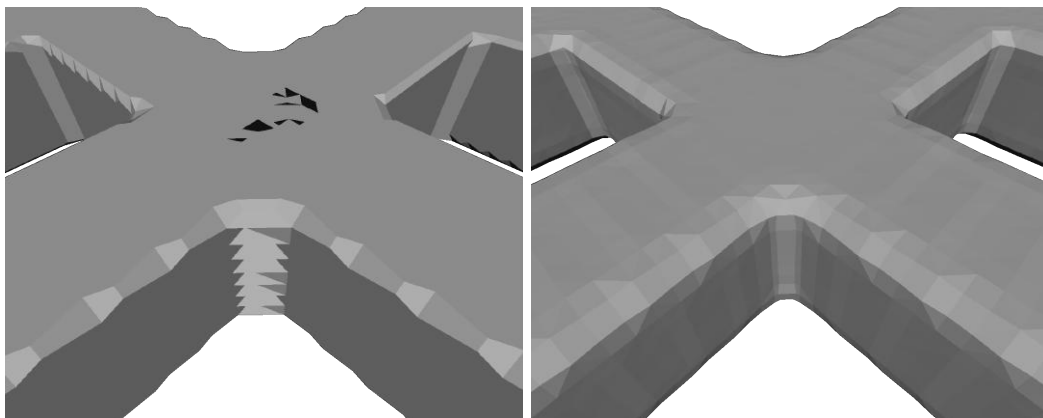
Ball pivot algorithm rekonstruuje dobře rovné povrchy, v některých částech však zanechává díry. Ostré hrany jsou však "zubaté", genus výsledného modelu je roven dvěma (obrázek 6.44).

Poisson surface reconstruction příliš zaobluje hrany, a v rovných plochách jsou vidět jemné nerovnosti. Genus výsledného modelu je roven dvěma (obrázek 6.44).

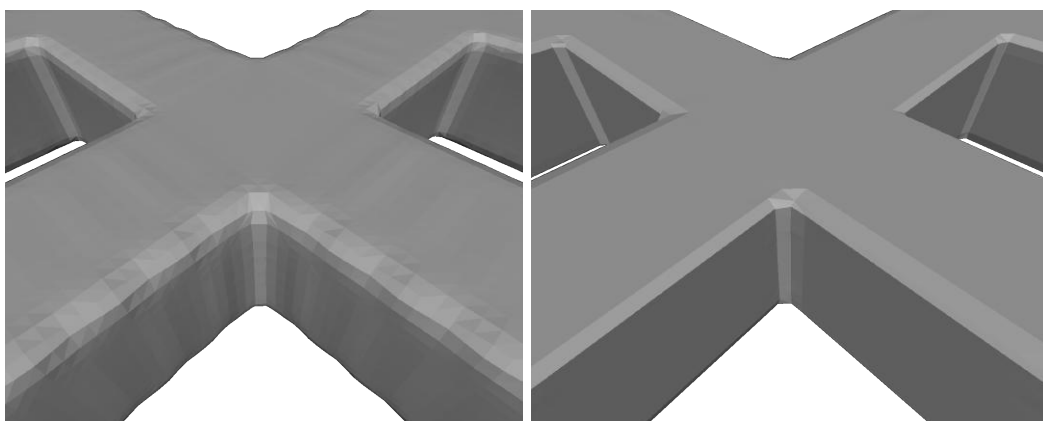
Fourier surface reconstruction poskytuje skoro identický výsledek jako Poisson. Zaobluje hrany, a v rovných plochách jsou vidět jemné nerovnosti. Genus výsledného modelu je roven dvěma (obrázek 6.45).

MPU naproti tomu poskytuje v podstatě dokonalou rekonstrukci. Rovné povrchy jsou dokonale hladké, rohy ostré a genus výsledného modelu je roven dvěma (obrázek 6.45).

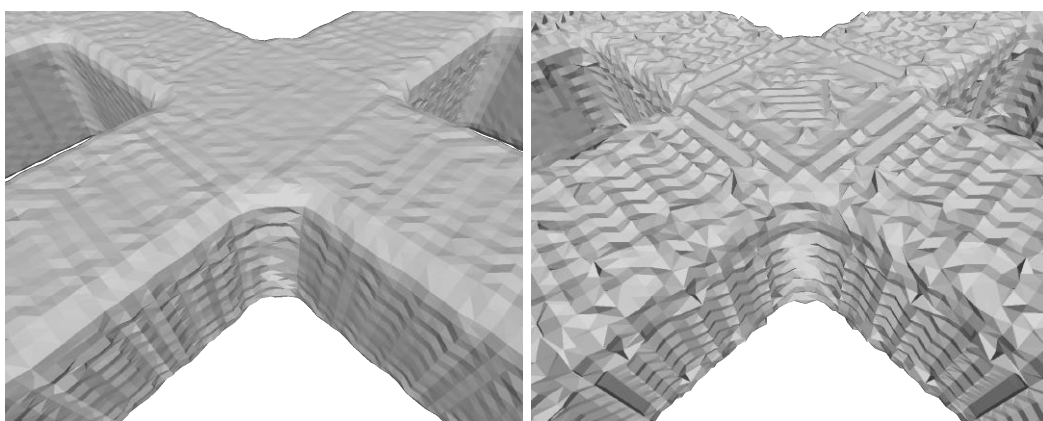
Wavelett surface reconstruction zanechává v rekonstruovaném modelu šum, a to jak na rovných plochách tak v rozích. Oba typy sdílí tyto problémy, Daub4 však produkuje hladší povrchy než Haar. Genus výsledného modelu obou typů je roven dvěma (obrázek 6.46).



Obrázek 6.44: Rekonstrukce mračna Torus algoritmem BPA a Poisson



Obrázek 6.45: Rekonstrukce mračna Torus algoritmem Fourier a MPU

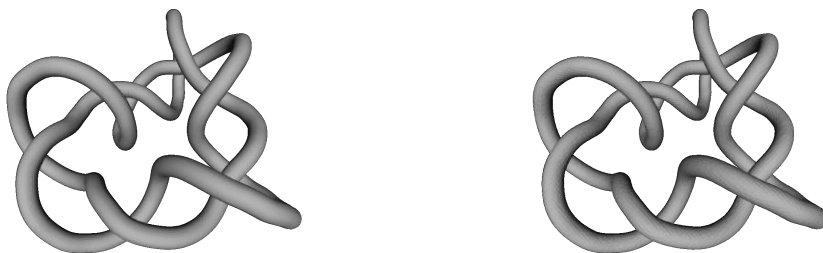


Obrázek 6.46: Rekonstrukce mračna Torus algoritmem Wavelet Daub4 a Haar

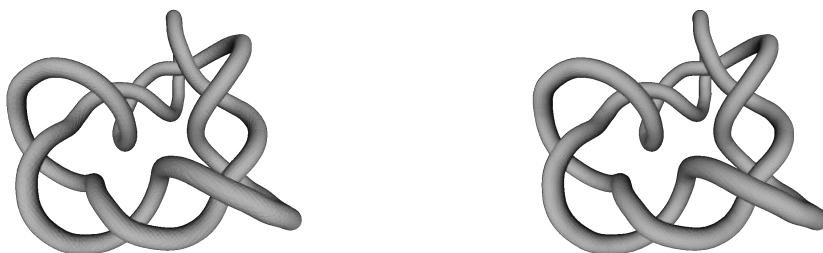
6.6 Uzel

V posledním testu zjistíme, jak jsi algoritmy povedou pokud mračno obsahuje provázaný model. Přesněji, zda jeho části nebudou spojeny po rekonstrukci. Pro tento účel použijeme mračno Knot. Parametry programů byly nastaveny na základní hodnoty.

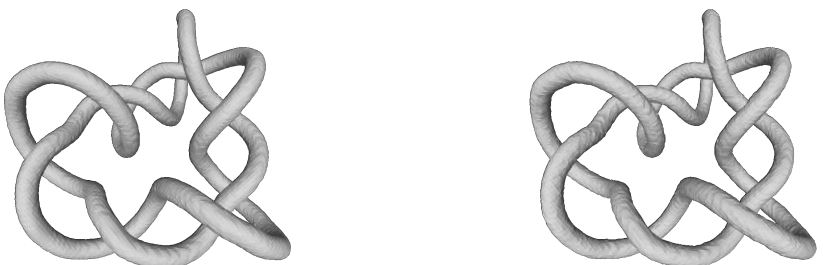
BPA poskytuje v tom to případě v podstatě nejlepší rekonstrukci (obrázek 6.47). Protože se jedná o vygenerované mračno uniformní hustoty, výsledná rekonstrukce neobsahuje žádné díry. Všechny algoritmy poskytují obstojné výsledky rekonstrukce povrchu, které nejsou nikde nesprávně propojeny (obrázek 6.48). Wavelet surface reconstruction však obsahuje malé množství šumu (obrázek 6.49).



Obrázek 6.47: Rekonstrukce mračna Knot algoritmem BPA a Poisson



Obrázek 6.48: Rekonstrukce mračna Knot algoritmem Fourier a MPU



Obrázek 6.49: Rekonstrukce mračna Knot algoritmem Wavelet Daub4 a Haar

6.7 Shrnutí

Nejlepších výsledků dosáhl napříč všemi testy Poisson, který poskytuje dobrou kvalitu rekonstruovaných povrchů, má malou časovou a paměťovou náročnost, dobře zvládá šum, mračna různé hustoty i chybějící data. Mezi jeho nevýhody patří zaoblování detailů, rekonstrukce rovných ploch a ostrých hran.

Poté následuje Fourier a MPU. Oba algoritmy poskytují na výstupu obstojný spojitý povrch, mají však tendenci k přílišnému vyhlazení. Fourier přesně rekonstruuje oblasti s velkou hustotou bodů, selhává však v oblastech s malou hustotou. Obstojně rekonstruuje zašuměná data i mračna s chybějícími daty. Jeho časová a paměťová náročnost však patří k nejvyšším. Fourier vždy vrací na výstupu vodotěsný model i pokud mračno reprezentuje nekompletní model. MPU má naproti tomu malou časovou i paměťovou náročnost, data jsou však příliš vyhlazená nehledě na hustou mračna. Nezvládá rekonstrukci mračen obsahujících šum a v mračnách s chybějícími daty může zanechat artefakty. Ty se v některých případech tvoří nekontrolovaně na rozích výsledných modelů. Při testu rekonstrukce rovin a ostrých hran však poskytuje nejlepší výsledek.

BPA vykazuje speciální vlastnosti, díky tomu že při rekonstrukci používá již existující body v mračnu, a proto poskytuje velice kvalitní výsledky na datech reprezentujících hladké povrchy s uniformní hustotou. Další výhodou je, že při rekonstrukci nekompletního modelu rekonstruuje pouze naskenovanou část a nesnaží se výsledný model nějak uzavřít. Pokud však mračno obsahuje různé hustoty na bodů v různých oblastech, výsledná rekonstrukce obsahuje velké množství děr, které se také vyskytují v ostrých záhybech. Další nevýhodou je jeho velká časová náročnost, která se rapidně zvyšuje s nárůstající velikostí mračna. Rekonstrukce z mračen obsahujících šum poskytují nekvalitní výsledky a dále umocňují problém s časovou náročností. Chybějící data v mračnu algoritmus nijak nerekonstruuje a ponechá ve výsledném povrchu díru.

Nejhorší výsledky poskytli oba typy Wavelet surface reconstruction. Jejich hlavní předností je velice malá časová a paměťová náročnost, všechny výsledné modely však obsahovali velké množství šumu a artefaktů. Výsledným povrchem prostupují "vlnky", které také snižují výslednou kvalitu. Špatně rekonstruují data obsahující šum, stejně tak i mračna obsahující chybějící data.

Kapitola 7

Závěr

Cílem této práce bylo poskytnout srovnání a vyhodnocení různých algoritmů, které rekonstruují povrch z orientovaného mračna bodů a na výstupu vracejí trojúhelníkovou síť. K těmto účelům byly použity implementace Ball pivot algorithm, Poisson surface reconstruction, Fourier surface reconstruction, MPU a Wavelet surface reconstruction. Ty byly následně aplikovány na předpřipravený dataset. Vyhodnocení proběhlo jak vizuálně, tak za použití měřených a vypočtených metrik.

Nejlepších výsledků dosáhl napříč všemi testy Poisson, který poskytuje dobrou kvalitu rekonstruovaných povrchů, má malou časovou a paměťovou náročnost, dobře zvládá šum, mračna různé hustoty i chybějící data. Poté následuje Fourier a MPU. Oba algoritmy poskytují na výstupu obstojný spojitý povrch, mají však tendenci k přílišnému vyhlazení. BPA vykazuje speciální vlastnosti, díky tomu že při rekonstrukci používá již existující body v mračnu, a proto poskytuje velice kvalitní výsledky na datech reprezentujících hladké povrchy s uniformní hustotou. Nejhorší výsledky poskytli oba typy Wavelet surface reconstruction. Jejich hlavní předností je velice malá časová a paměťová náročnost, všechny výsledné modely však obsahovali velké množství šumu a artefaktů.

Tato práce může být v budoucnosti dále rozšířena o více dostupných implementací algoritmů rekonstrukce povrchu, obsahovat další metriky nebo se mohou provést testy na větším datasetu.

Literatura

- [1] Cignoni, P.: MeshLab Stuff. Jan 1970.
URL <http://meshlabstuff.blogspot.cz/2010/01/measuring-difference-between-two-meshes.html>
- [2] Kazhdan: Reconstruction of solid models from oriented point sets. In *Symposium on Geometry Processing*, 2005, s. 73–82.
- [3] Maiti, A.; Chakravarty, D.: Performance analysis of different surface reconstruction algorithms for 3D reconstruction of outdoor objects from their digital images. 2016.
URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4929111/>
- [4] Manson, J.; Petrova, G.; Schaefer, S.: Streaming surface reconstruction using wavelets. In *Computer Graphics Forum*, ročník 27, Wiley Online Library, 2008, s. 1411–1420.
- [5] Michael Kazhdan, M. B.; Hoppe, H.: Poisson surface reconstruction. 2006: s. 61–70.
- [6] Mittleman, F. B. J.; Silva, H. R. C.; Taubin, G.: The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, ročník 5, č. 4, 1999.
- [7] Ohtake, Y.; Belyaev, A.; Alexa, M.; aj.: Multi-level partition of unity implicits. In *Acm Siggraph 2005 Courses*, ACM, 2005, str. 173.
- [8] Wikipedia: Hausdorff distance — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hausdorff%20distance&oldid=731966980>, 2017, [Online; accessed 17-May-2017].
- [9] Wikipedia: Root mean square — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Root%20mean%20square&oldid=773094388>, 2017, [Online; accessed 17-May-2017].

Příloha A

Obsah přiloženého CD

- Algorithms/– Implementace algoritmů spolu se skripty
 - BPA/
 - Fourier/
 - Poisson/
 - MPU/
 - Wavelet/
- Dataset/– Data pro rekonstrukce
- Results/ – Výsledné polygonální modely
 - Armadillo/
 - Buddha/
 - Bunny/
 - Torus/
 - Knot/
- tex/– Zdrojové soubory k této práci
- dokumentace.pdf– Tato práce ve formátu pdf